	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(103)	

i

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	DANILO VEGA VEGA JOHAN ARLEY NAVARRO CONTRERAS		
FACULTAD	INGENIERÍAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA CIVIL		
DIRECTOR	NELSON AFANADOR GARCÍA		
TÍTULO DE LA TESIS	CONECTORES MECÁNICOS PARA LA UNIÓN DE VARILLAS DE ACERO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO		
RESUMEN			
<p>EL PRESENTE TRABAJO DE GRADO, MODALIDAD MONOGRAFÍA, TUVO COMO OBJETIVO LA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EL USO DE LOS CONECTORES MECÁNICOS COMO UNA ALTERNATIVA RESPECTO AL SISTEMA TRADICIONAL POR TRASLAPO DE LAS VARILLAS DE ACERO EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.</p> <p>DURANTE EL DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA SE LLEVARON A CABO ENSAYOS DE LABORATORIO QUE PERMITIERON CORROBORAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS CONECTORES Y DEMÁS ASPECTOS A CONSIDERAR PARA SU UTILIZACIÓN.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 100	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1



CONECTORES MÉCANICOS PARA LA UNIÓN DE VARILLAS DE ACERO EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Autores:

DANILO VEGA VEGA

JOHAN ARLEY NAVARRO CONTRERAS

Trabajo de grado, modalidad de monografía, para optar el título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

Ph.D. NELSON AFANADOR GARCÍA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTADER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Febrero, 2020

Nota

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 0020 de fecha 16 de agosto de 2019, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes **Mauricio Pino Lobo y Jesús Antonio Palacio Amaya.**

Tabla de contenido

Introducción	xiv
Capítulo 1. Conectores mecánicos para la unión de varillas de acero en estructuras de concreto reforzado	17
1.1. Empalmes de barras de acero de refuerzo	17
1.1.1. Concreto reforzado.	17
1.2. Adherencia entre el concreto y el acero	19
1.3 Empalmes de barras de acero	20
1.3.1 Empaque por traslapo.	22
1.3.2 Empalme por conexiones mecánicas..	24
1.3.3 Empalme por soldadura.	26
1.4 Longitud de desarrollo	27
 Capítulo 2. Conectores Mecánicos.....	 29
2.1 Tipos de empalmes mecánicos	30
2.2 Tipos de conectores mecánicos y casos para su uso	31
2.3 Requisitos para evaluar el comportamiento de los conectores mecánicos	33
2.4 Aspectos generales para el uso de conectores mecánicos	36
2.4.1 Espaciamiento y recubrimiento..	37
2.4.2 Correspondencia entre las alineaciones en los extremos, preparación de los extremos de las varillas, corrugados especiales de las varillas, y equipo..	39
2.4.3 Varillas de refuerzo recubiertas..	40
2.4.4 Montaje en el campo.....	41
2.5 Conectores mecánicos disponibles en el mercado.....	41
2.5.1 Conector con rosca cónica o ahusada.	42
2.5.2 Conector separado con roscas estándar.	43
2.5.3 Conector mecánico relleno de acero.....	44
2.5.4 Conector estampado en frío..	45
2.5.5 Conector mecánico de acero con cuña.	46
2.5.6 Conector mecánico de acero tipo fleje.	47
2.5.7 Terminales o barras con cabeza.....	48
2.5.8 Conector mecánico roscado..	48
2.5.9 Conector mecánico roscado de transición.....	49
2.5.10 Conector mecánico extruido.....	49
2.5.11 Conector mecánico de tornillo.....	49
2.6 Ejemplo de instalación de un conector mecánico	50

Capítulo 3. Comportamiento de los conectores mecánicos	57
3.1 Ensayo de tensión en barras de acero	57
3.2 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad de Kansas, Estados Unidos	59
3.3 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Estatal de Moscú, Rusia	61
3.4 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad de Costa Rica.....	62
3.5 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia	64
3.6 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, República Dominicana	66
3.7 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos por el National Cooperative Highway Research Program Transportation, Estados Unidos	67
3.8 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en Ecuador y Chile.....	68
3.9 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, Colombia	69
Capítulo 4. Análisis económico de los empalmes para barras de refuerzo.....	75
Capítulo 5. Conclusiones	82
Referencias.....	84
Apéndices.....	88

Lista de Tablas

Tabla 1. Espaciamiento para conectores mecánicos solo a compresión	37
Tabla 2 Espaciamiento para conectores mecánicos a tensión-compresión	38
Tabla 3. Características del conector mecánico roscado estándar	51
Tabla 4 Resistencia a la fluencia y a la tracción de las probetas ensayadas	72
Tabla 5 Costos de empalmes mecánicos utilizados en el edificio T7T8	77
Tabla 6 Costos de empalmes traslapados que se habrían utilizado en el edificio T7T8.....	77
Tabla 7 Costos de empalmes mecánicos utilizados en el Hotel Grand Hyatt.....	77
Tabla 8 Costos de empalmes traslapados que se habrían utilizado en el Hotel Grand Hyatt	78
Tabla 9. Precios de conectores instalados en el metro de Lima, Perú	79
Tabla 10. Precios de traslapos instalados en el metro de Lima, Perú	79
Tabla 11. Precio de algunos conectores mecánicos en Colombia.....	81
Tabla 12. Características físicas del conector mecánico BarGrip XL	90
Tabla 13. Características físicas del conector mecánico Taper Threaded Grip Twist.....	92
Tabla 14. Características del conector mecánico Zap Screwlok.....	94

Lista de Figuras

Figura 1. Efecto de acuñamiento del hormigón entre corrugaciones.....	20
Figura 2. Empalme por traslape o solape.....	22
Figura 3. Algunos conectores mecánicos.....	24
Figura 4. Soldadura en las barras de acero.....	26
Figura 5. Conector con rosca cónica o ahusada	42
Figura 6. Cople o conector separado con rosca estándar	43
Figura 7. Conector mecánico relleno de acero.....	45
Figura 8. Conector estampado en frío	46
Figura 9. Conector mecánico de acero con cuña.....	47
Figura 10. Conector mecánico de acero tipo fleje.....	47
Figura 11. Terminales o barras con cabeza.....	48
Figura 12. Conector mecánico roscado	48
Figura 13. Conector mecánico roscado de transición.....	49
Figura 14. Conector mecánico extruido	49
Figura 15. Conector mecánico de tornillo.....	50
Figura 16. Conector mecánico roscado estándar.....	51
Figura 17. Figurado de las extremidades de las barras de acero.....	52
Figura 18. Acoplamiento del conector en la barra de acero.....	53
Figura 19. Acoplamiento de la segunda barra de acero al conector.....	53
Figura 20. Protección del conector roscado	54
Figura 21. Probetas de acero después de sufrir la rotura en el ensayo de tensión.	63
Figura 22. Empalmes mecánicos elaborados para el ensayo de tensión.	63
Figura 23. Probetas con empalme después de la falla a tracción	65
Figura 24. Probetas sin empalme después de la falla a tracción	65
Figura 25. Ensayo de las probetas de acero empalmadas con conectores mecánicos.....	67
Figura 26. Probetas de concreto reforzado para aplicar el ensayo de tensión.....	69
Figura 27. Probetas de acero empalmadas mecánicamente	70
Figura 28. Medición de las características de las probetas de acero.....	71
Figura 29. Aplicación de la carga axial a las probetas de acero.....	71

Figura 30. Probetas de acero después realizar el ensayo de tracción	72
Figura 31 .Resistencia a la fluencia de las probetas ensayadas.....	73
Figura 32. Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas.....	74
Figura 33. Edificio T7T8.....	76
Figura 34. Hotel Grand Hyatt.....	76
Figura 35. Conector mecánico BarGrip XL.....	89
Figura 36. Corte transversal del conector mecánico BarGrip XL.....	90
Figura 37. Conector mecánico Taper Threaded Grip-Twist	91
Figura 38. Dimensionamiento del conector mecánico Taper Threaded Grip Twist	92
Figura 39. Conector mecánico Zap-Scewlock	93
Figura 40. Dimensionamiento del conector mecánico Zap Screwlok.....	94
Figura 41. Resultados ensayo de tensión probeta #6-1	95
Figura 42. Esfuerzo vs deformación probeta #6-1	95
Figura 43. Resultados ensayo de tensión probeta #6-2	96
Figura 44. Esfuerzo vs deformación probeta #6-2	96
Figura 45. Resultados ensayo de tensión probeta #6-3	97
Figura 46. Esfuerzo vs deformación probeta #6-3	97
Figura 47. Resultados ensayo de tensión probeta #7-1	98
Figura 48. Esfuerzo vs deformación probeta #7-1	98
Figura 49. Resultados ensayo de tensión probeta #7-2	99
Figura 50. Esfuerzo vs deformación probeta #7-2	99
Figura 51. Resultados ensayo de tensión probeta #7-3	100
Figura 52. Esfuerzo vs deformación probeta #7-3	100
Figura 53. Resultados ensayo de tensión probeta #8-1	101
Figura 54. Esfuerzo vs deformación probeta #8-1	101
Figura 55. Resultados ensayo de tensión probeta #8-2	102
Figura 56. Esfuerzo vs deformación probeta #8-2	102
Figura 57. Resultados ensayo de tensión probeta #8-3	103
Figura 58. Esfuerzo vs deformación probeta #8-3	103

Lista de Apéndices

Apéndice A. Características de 3 tipos de conectores mecánicos.....	89
Apéndice B. Ensayos de tensión	95

Glosario

Acero: es un material que ofrece muchas funciones dentro del sector de la construcción gracias a su resistencia y poco peso. Se origina de la aleación de hierro con carbono siendo la elasticidad y ductilidad unas de sus principales propiedades, deformándose ampliamente antes del colapso ante la presencia de grandes cargas. (Astorga & Rivero, 2009).

Camisa de acoplamiento: dispositivo sin rosca que se adapta a los extremos de dos varillas de refuerzo, para el propósito eventual de proporcionar transferencia de compresión axial o de tensión axial, o ambas, de una varilla a la otra (ACI Committee 439, 1999).

Camisa de apoyo de extremo: dispositivo que se adapta a los extremos lindantes de dos varillas de refuerzo con el propósito de asegurar la transferencia, sólo de compresión axial de una varilla a la otra (ACI Committee 439, 1999).

Carga: fuerza proveniente del exterior que actúa en distintas dirección sobre una estructura. Se clasifican en cargas vivas, muertas, dinámicas o estáticas. Es común la utilización de este tipo de cargas en los diseños estructurales, existiendo condiciones para el uso de las cargas muertas, vivas, puntuales, distribuidas, axiales, de servicio y sísmicas (Astorga & Rivero, 2009).

Compresión: es la fuerza resultante de la acción de oprimir un elemento, buscando comprimirlo o acortarlo, en sentido de la fuerza (Astorga & Rivero, 2009).

Cople: dispositivo con rosca para unir varillas de refuerzo con el propósito de proporcionar transferencia, ya sea de compresión axial o de tensión axial o ambas, de una varilla a la otra (ACI Committee 439, 1999).

Flexión: esfuerzo que incluye la tracción y la compresión, cambiando la dirección de las fuerzas. Este tipo de esfuerzo es propio de las vigas, las cuales ante la acción de su propio peso y fuerzas adicionales, generan esfuerzos perpendiculares que conllevan a la deformación de la pieza (Astorga & Rivero, 2009).

Introducción

El sector de la construcción presenta cambios destinados a mejorar los tiempos, disminuir los costos y ofrecer productos de una mejor calidad en lo referente a la unión del refuerzo en las diversas estructuras que requieren su implementación, elevando de esta manera los estándares competitivos en cuanto a calidad y grado de eficiencia. Esto como consecuencia de la evolución que han presentado las construcciones civiles a lo largo de las últimas décadas, donde el uso de refuerzos longitudinales de tamaños mayores a los usados hace algunos años hace ineficiente los métodos constructivos convencionales.

Un impulsor de este cambio ha sido el desarrollo por parte de diversas empresas de mecanismos o dispositivos que faciliten la unión de las varillas en el armado del acero de refuerzo, denominándose en el mercado con el nombre de conectores mecánicos. Para su utilización se han desarrollado procedimientos que faciliten una adecuada instalación en obra y de esta forma brinden al personal encargado de este procedimiento una orientación pertinente para mejorar el desempeño de estos sistemas de empalme.

Los conectores mecánicos han sido utilizados ampliamente en países como Estados Unidos, China y la mayoría de países europeos. En Colombia, se han desarrollado varios proyectos con este sistema de empalme, sin embargo, existe un amplio desconocimiento sobre los conectores mecánicos y las ventajas que generan para las construcciones (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).

Por lo anterior, se hizo necesario realizar una recopilación de información que permitiera abordar de manera detallada los aspectos concernientes al uso de los conectores mecánicos. El desarrollo de esta monografía tuvo como objetivo dar respuesta a la siguiente pregunta ¿son los conectores mecánicos una alternativa viable para la unión de varillas de acero en estructuras de concreto?

Para dar respuesta a este interrogante, se tuvo en cuenta investigaciones realizadas hasta la fecha en diferentes países donde se han estudiado el comportamiento de los conectores mecánicos, así como los análisis económicos efectuados entre diferentes sistemas de empalmes. Las referencias fueron seleccionadas al ser trabajos y artículos publicados por universidades e instituciones reconocidas internacionalmente.

La elaboración de esta monografía tuvo una duración de dieciséis (16) semanas, tal como se planteó en el cronograma de actividades. El estudio de compilación fue llevado a cabo en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, siendo una monografía de tipo descriptivo, recolectando información de las referencias bibliográficas. Se aplicó una técnica de investigación de análisis de contenido, aplicando un criterio objetivo durante el estudio. Así mismo es importante resaltar que se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para obtener valores que permitieran corroborar parte de la información disponible.

La presente monografía se desarrolló en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Empalmes de barras de acero de refuerzo

Capítulo 2. Conectores mecánicos

Capítulo 3. Comportamiento de los conectores mecánicos

Capítulo 4. Análisis económico de los empalmes para barras de refuerzo

Capítulo 5. Conclusiones.

Capítulo 1. Conectores mecánicos para la unión de varillas de acero en estructuras de concreto reforzado

1.1. Empalmes de barras de acero de refuerzo

1.1.1. Concreto reforzado. Se denomina concreto a la mezcla de arena, roca triturada, u otros agregados los cuales son unidos mediante la adicción de una pasta de cemento y agua. Generalmente, los aditivos son añadidos para cambiar ciertas características del concreto, como el tiempo de fraguado, la ductilidad y durabilidad (McCormac & Brown, 2011).

El concreto se caracteriza por su alta resistencia a la compresión, pero al igual que la mayor parte de piedras naturales ofrece una muy baja resistencia a la tracción, por lo que presenta inconvenientes al utilizarse en elementos que trabajen a flexión o a tracción. Sin embargo, cuando el concreto es reforzado con varillas de acero en las zonas de tensión da como resultado el llamado concreto reforzado. Esta combinación presentan las condiciones necesarias para soportar los distintos esfuerzos que se presentan en las construcciones (Jiménez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabré, 2000).

El uso del concreto reforzado como material de construcción se inició gracias al trabajo de los franceses Monier y Coignet, quienes para el año 1861 formularon las primeras reglas para la fabricación de bóvedas, tubos, vigas, etc. Desde esa época, y por más de un siglo, el concreto reforzado ha sido implementado ampliamente, siendo hoy día un material utilizado en numerosas

aplicaciones, mucho más que cualquier otro material de construcción (Jiménez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabré, 2000).

Esta generalidad aceptada para el uso del concreto reforzado, se debe a las ventajas que presenta respecto a otros materiales de construcción. Una de sus mayores ventajas es que el concreto genera cal libre (Ca(OH)_2) durante su fraguado y endurecimiento, lo que hace que tenga un pH muy elevado (12, aproximadamente). Este ambiente alcalino protege al acero de un posible proceso de corrosión (Hernández Montes & Gil Martín, 2007).

Así mismo, el acero se distingue por ser vulnerable frente a la acción del fuego, por lo que el recubrimiento de concreto le confiere un gran aislamiento. Este efecto conjunto generara que el concreto pueda permanecer expuesto a grandes temperaturas durante horas sin que su capacidad mecánica se vea alterada (Hernández Montes & Gil Martín, 2007).

Así mismo, el concreto reforzado brinda una gran rigidez a cualquier estructura, exigiendo poco mantenimiento, además de proporcionar una larga vida de servicio. El concreto reforzado en apropiadas condiciones, puede usarse indefinidamente sin reducciones de carga, debido a que la resistencia no disminuye con el tiempo, sino que aumenta con los años debido al largo proceso de solidificación de la pasta de cemento (Hernández Montes & Gil Martín, 2007).

Estas ventajas han convertido al concreto reforzado en el material de construcción por excelencia, pero sin lugar a dudas, su principal ventaja respecto a otros materiales es su cualidad de formáceo o moldeabilidad, es decir, de adoptar la forma del molde que la contiene. Ello

proporciona mayor libertad al proyectar estructuras, pues aumenta la elección de formas a emplear (González Cuevas & Robles Fernández, 2005).

1.2. Adherencia entre el concreto y el acero

La *adherencia* es el fenómeno que explica la excelente combinación entre el concreto y el acero, ya que sin está, las varillas de acero no podrían soportar los esfuerzos de tracción, ya que el acero se deslizaría fácilmente y no acompañaría al concreto en sus deformaciones, dando como resultado fisuraciones que ocasionaría una brusca rotura. Pero debido a la adherencia el acero logra trabajar junto con el concreto, por lo que cuando este último se fisura, lograr hacerlo de forma regularmente distribuida, permitiendo que el acero tome los esfuerzos de tensión y manteniendo la unión entre los dos materiales en las zonas entre fisuras (Jiménez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabré, 2000).

La adherencia se presenta debido a varios factores, entre ellos la adherencia química entre los materiales, la fricción que produce la rugosidad natural de las varillas y el apoyo en el concreto de las corrugaciones estrechamente espaciadas en las superficies de las varillas (McCormac & Brown, 2011).

La adherencia se origina por causas de naturaleza física y de naturaleza mecánica. En el primer caso, la adhesión del acero y el concreto por medio de fuerzas capilares y moleculares en su interfaz llevan a que el acero simule una absorción de pasta cementante, ayudado por el efecto de la retracción. En el segundo caso, la resistencia al deslizamiento debido a la penetración del

cemento en las irregularidades de las superficies de la barra da origen al denominado *rozamiento*. Para el caso de barras corrugadas, a este rozamiento se añade el efecto de *acuñamiento* del concreto entre los resaltos (ver figura 1), de ahí el uso prioritario de las barras corrugadas en obras de construcción (Jiménez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabré, 2000).

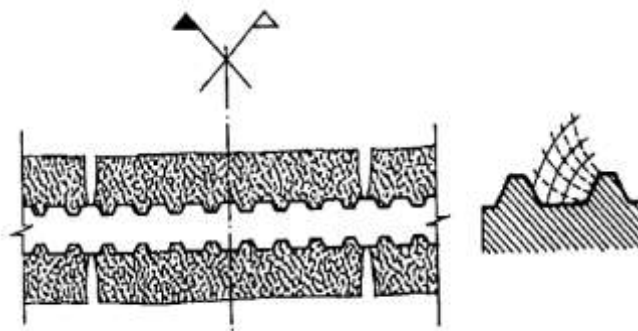


Figura 1. Efecto de acuñamiento del hormigón entre corrugaciones.

Fuente: Jiménez Montoya, García Meseguer & Morán Cabré, 2000, Hormigón Armado, p.162

1.3 Empalmes de barras de acero

Los empalmes son uniones que permiten dar continuidad al refuerzo por efecto de la transferencia de tensiones entre el acero y el hormigón (Giraldo Bolivar, 2003, p.62). Estos empalmes son utilizados por las limitaciones en las longitudes de las varillas disponibles, a los requisitos de juntas de construcción y a los cambios de varillas grandes a varillas más pequeñas (McCormac & Brown, 2011).

A pesar de que en el mercado existen una gran cantidad de fabricantes de refuerzo convencional para el concreto reforzado y de que se han estandarizado ciertas longitudes que

facilitan los procesos productivos como las operaciones de transporte y almacenamiento en obra del producto, siendo las varillas más comerciales las de 6.0 m (20 pies) y 12 m (40 pies), en muchas obras, en especial en estructuras monolíticas, estas longitudes no son suficientes y se requiere empalmar las varillas para lograr las longitudes de refuerzo requeridas (Giraldo Bolívar, 2003). Los empalmes pueden ser llevado a cabo por medio de *traslapo o solape* de las barras, utilizando *conexiones mecánicas* y mediante *soldadura* (Arriagada Meza, 2007).

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, en el numeral C.12.14.1 estipula que en el refuerzo sólo se permite hacer empalmes cuando lo requieran o permitan los planos de diseño, las especificaciones, o si lo autoriza el profesional facultado para diseñar (NSR, 2010).

Los empalmes se dividen en directos e indirectos. Los directos se caracterizan por la transferencia de esfuerzos de barra a barra directamente sin la intervención del concreto, como ocurre en los empalmes por soldadura y por elementos mecánicos, como conectores roscados o a presión. En el caso del empalme indirecto, las barras de acero transmiten los esfuerzos a través del concreto que les rodea, como en el caso de empalmes por traslapo, donde en ocasiones es necesario la intervención de barras de acero transversales y en condiciones especiales, en estribos de confinamiento (González & Cuevas Florián, 2018).

1.3.1 Empaque por traslapo. El tipo de empalme más empleado es el traslapo, el cual se lleva a cabo con las barras traslapadas en contacto y amarradas con alambre, como se observa en la figura 2. Es común que se permita espacio entre ellas las varillas, siempre que esta separación sea inferior a la especificada en las normas (González Cuevas & Robles Fernández, 2005).

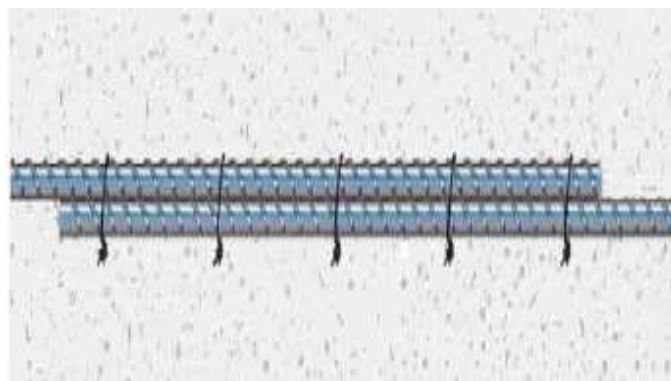


Figura 2. Empalme por traslapo o solape

Fuente: Arriagada Meza, Rodrigo Andrés, 2007, Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 5

El traslapo es el empalme comúnmente utilizado para las barras de diámetros menores. Sin embargo, este tipo de empalme puede ocasionar un alto consumo de acero para varillas de diámetros mayores, debido a las longitudes de unión requeridas, así como conllevar a un congestionamiento exagerado del armado (González Cuevas & Robles Fernández, 2005).

La NSR-10 en el numeral C.12.14.2.1 indica que para las barras mayores de No. 36 no se deben utilizar empalmes por traslapo, excepto para los casos indicados en C.12.16.2 y C.15.8.2.3. Así mismo explica que debido a la carencia de datos experimentales adecuados sobre empalmes por traslapo de barras No. 14 (45 mm) y No. 18 (55 mm) en compresión y en tracción, el

empalme por traslapo de estos tamaños de barras está prohibido, excepto para los dos casos enumerados anteriormente (NSR, 2010).

En el primer caso, numeral C.12.16.2 de la NSR-10, se explica que cuando se empalman por traslapo barras de diferentes diámetros en compresión, la longitud del empalme por traslapo debe ser la mayor longitud de desarrollo en compresión de la barra de mayor tamaño, o la longitud del empalme en compresión por traslapo de la barra de diámetro menor, en este caso, se permite empalmar por traslapo barras No. 14 y No. 18 con barras de diámetro No. 36 y menores (NSR, 2010).

En el segundo caso, numeral C.15.8.2.3. de la NSR-10, se indica que para zapatas, se permite el empalme por traslapo de las barras longitudinales de diámetro No. 43 y No. 57, sólo en compresión, con pasadores (dowels, en inglés) para proporcionar el refuerzo requerido para satisfacer lo estipulado en C.15.8.1, donde se establece que las fuerzas y los momentos en la base de columnas, muros o pedestales deben transmitirse al pedestal de apoyo o a la zapata a través del concreto por aplastamiento y mediante refuerzo, pasadores, y conectores mecánicos. Los pasadores no deben ser mayores que barras No. 36 y deben extenderse dentro del elemento soportado por una distancia no menor que la longitud de desarrollo a compresión, de barras No. 43 y No. 57, y la longitud de empalme por traslapo para compresión de los pasadores, la que sea mayor, y dentro de la zapata por una distancia no menor que la longitud de desarrollo a compresión de los pasadores (NSR, 2010).

Esta disposición constituye una excepción al numeral C.12.14.2.1, en la cual se prohíbe el empalme por traslape de barras No. 43 y No. 57. Este es el resultado de muchos años de experiencia satisfactoria con empalmes por traslape de barras de gran diámetro para columnas con pasadores de zapatas de menor diámetro. La relación de la restricción en el tamaño de la barra de traspaso es un reconocimiento al problema de la longitud de anclaje de las barras de gran diámetro, y para fomentar el uso de barras de traspaso de diámetro reducido, con lo que probablemente se obtienen ahorros en la altura de las zapatas (NSR, 2010).

1.3.2 Empalme por conexiones mecánicas. La NSR- 10. La NSR-10 numeral C.12.14.3.1. Expresa que debe permitirse el uso de empalmes mecánicos. El empalme mecánico consiste en utilizar piezas metálicas de conexión de varillas (ver figura 3) que facilitan la construcción de elementos de concreto armado y reducen el congestionamiento de armaduras. En el caso de traslapes, el esfuerzo transmitido depende en gran parte de la buena adherencia con el concreto, mientras que en los dispositivos de conexión mecánica (conectores) siempre funciona correctamente y no se ve afectado por problemas de figuración, asegura la continua distribución *de carga en la barra, sin depender de la condición o de la existencia del concreto* (Avendaño Cruz & Cuevas Velásquez, 2014).

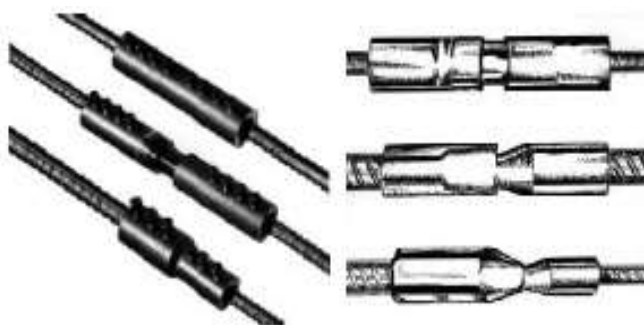


Figura 3. Algunos conectores mecánicos

Fuente: Arriagada Meza, Rodrigo Andrés, 2007, Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 10.

En el numeral C.12.14.3.2 de la NSR-10, se establece que todo empalme mecánico completo debe desarrollar en tracción o compresión, según sea requerido, al menos $1.25f_y$ (esfuerzo de fluencia (MPa)) de la barra, esto con el fin de asegurar la suficiente resistencia en los empalmes de manera que se pueda producir la fluencia en el elemento y evitarse así la falla frágil. Se seleccionó este valor tanto como un valor mínimo por seguridad y un valor máximo por economía (NSR, 2010).

Los empalmes mecánicos que no satisfagan con el requisito anterior, según el numeral C.12.14.3.5 de la NSR-10, se permiten sólo para barras No. 5 (16 mm) y menores y de acuerdo con lo establecido en C.12.15.4 y los requisitos mínimos de diseño de C.12.15.5 (NSR, 2010).

El numeral C.12.15.4 detalla que si el empalme mecánico cumple con el 125% de la resistencia a la fluencia especificada cuando se encuentra localizado en regiones con tracciones en el refuerzo elevadas, dichos empalmes no necesitan estar escalonados, aunque dicho escalonamiento es aconsejable donde el área de refuerzo es menos del doble de la requerida por cálculo (NSR, 2010).

Por otra parte, el numeral C.12.15.5 establece que si los conectores no cumplen con el requisito de $1.25f_y$ estos deben cumplir con lo establecido en los numerales del C.12.15.5.1 a C.12.15.5.3. El primero, el C.12.15.5.1 indica que los empalmes deben estar escalonados cuando menos 600 mm. El segundo, el C.12.15.5.2 establece que al momento de calcular las fuerzas de tracción que pueden ser desarrolladas en cada sección, el esfuerzo en el refuerzo empalmado debe tomarse como la resistencia especificada del empalme, pero no mayor que f_y . Y por último el

numeral C.12.15.5.3 indica que la fuerza de tracción total que puede ser desarrollada en cada sección debe ser de al menos el doble que la requerida por el análisis, y al menos 140 MPa veces el área total del refuerzo proporcionado.

1.3.3 Empalme por soldadura. Al igual que para los empalmes mecánicos, el numeral C.12.14.3.1 establece que debe permitirse el uso de empalmes soldados. Todo empalme totalmente soldado debe desarrollar, por lo menos, $1.25f_y$ (esfuerzo de fluencia (MPa) de la barra, requisito indicado en el numeral C.12.14.3.4 (NSR, 2010).

El empalme soldado se utiliza principalmente para barras grandes (No. 19 y mayores) en elementos principales. El requisito de resistencia a la tracción, de 125% de la resistencia a la fluencia especificada está pensado para lograr una soldadura apropiada, adecuada también para compresión. Los empalmes soldados cuando no cumplen con este requisito pueden emplearse según lo indicado en el numeral C.12.14.3.5 de la NSR-10 al igual que los empalmes mecánicos. En la figura 4 se observa el proceso de soldadura de las barras (NSR, 2010).



Figura 4. Soldadura en las barras de acero

Fuente: Arriagada Meza, Rodrigo Andrés, 2007, Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 8.

1.4 Longitud de desarrollo

Todos los esfuerzos en las varillas deben transmitirse al concreto mediante la adherencia entre el acero y el concreto antes de que se puedan cortar las varillas. En este caso éstas deben prolongarse cierta distancia dentro del apoyo y hacia la viga para anclarla o para desarrollar su resistencia. Esta distancia es llamada *longitud de desarrollo o longitud de anclaje* (ℓ_d). Ésta consiste en la longitud mínima de empotramiento de una varilla que es necesaria para que trabaje a su esfuerzo de fluencia, más cierta distancia adicional para asegurar la tenacidad del miembro. (McCormac & Brown, 2011).

El concepto de longitud de desarrollo se basa en el esfuerzo de adherencia obtenible sobre la longitud embebida del refuerzo. Las longitudes de desarrollo especificadas se requieren, en gran medida, por la tendencia de las barras sometidas a esfuerzos altos a fisurar el concreto que retiene la barra cuando las secciones de concreto son relativamente delgadas. Una barra individual embebida en una masa de concreto no necesita una longitud de desarrollo tan grande; aunque una fila de barra, aun en concreto masivo, puede crear un plano débil con agrietamiento longitudinal a lo largo del plano de dichas barras (NSR, 2010).

La longitud de desarrollo requiere longitudes o extensiones mínimas del refuerzo más allá de todos los puntos de esfuerzo máximo en el refuerzo. Tales esfuerzos máximos generalmente ocurren en los puntos especificados en la sección C.12.10.2. de la NSR-10, donde se establece que las secciones críticas para el desarrollo del refuerzo en elementos sometidos a flexión son los

puntos donde se presentan esfuerzos máximos y puntos del vano donde termina o se dobla el refuerzo adyacente (NSR, 2010).

El numeral C.12.1.1 de la NSR-10, expresa que la tracción o compresión calculada en el refuerzo de cada sección de elementos de concreto estructural debe ser desarrollada hacia cada lado de dicha sección mediante una longitud embebida en el concreto por medio de gancho, barra corrugada con cabeza o dispositivo mecánico, o una combinación de ellos. Los ganchos y barras corrugadas con cabeza no se deben emplear para desarrollar barras en compresión (NSR, 2010).

La longitud de desarrollo depende del esfuerzo al que está sometido el refuerzo, variando las ecuaciones y condiciones necesarias para su obtención, el código ACI (American Concrete Institute) y el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, establecen expresiones para determinar la longitud de desarrollo, especialmente en barras corrugadas, dado que es el tipo de varillas comúnmente empleadas en obra. En cualquier caso, el valor de la longitud de desarrollo bajo esfuerzo de tensión no debe ser inferior a 300 mm. Bajo esfuerzos de compresión, aunque no se da el mismo debilitamiento que existe en las grietas de tracción por flexión, por lo que se han especificado longitudes de desarrollo menores, en ningún caso se deben tomar longitudes menores de 200 mm (NSR, 2010).

Capítulo 2. Conectores Mecánicos

Los empalmes diseñados adecuadamente son un elemento clave en cualquier diseño bien ejecutado. El empalme por traslapo, cuando las condiciones lo permitan y cuando satisfaga todos los requisitos, generalmente es el método más común para empalmar barras de refuerzo, en especial las de menores diámetros. Sin embargo, cuando los empalmes por traslapo son indeseables o poco prácticos, o cuando su uso no está permitido por el código de diseño o la especificación de diseño se deben usar conexiones mecánicas o soldadas (ACI Committee 439, 1999).

Los empalmes soldados, desde el punto de vista de la transmisión de esfuerzos, son los mejores empalmes, pero pueden ser caros y causar problemas metalúrgicos, mostrando resultados desastrosos en zonas de alta sismicidad (McCormac & Brown, 2011). Ante esta situación, un creciente número de empresas de la construcción tienen la intención de abandonar las conexiones soldadas, ya que son consumidoras de energía, requieren la contratación de operadores de soldadura altamente cualificados y controles de calidad muy sofisticados y la conexión de un gran número de barras es inherente a un alto consumo de mano de obra (D'yachkov, Devyatov, & Vershinin, 2012).

De esta forma, el conector mecánico se ha convertido en una de las mejores alternativas entre los distintos tipos de empalmes empleados. Sin embargo, debe aclararse que la utilización de los conectores mecánicos se traduce principalmente en el aumento de la durabilidad de conexión, que es importante para las estructuras de gran altura, mientras que el ahorro de

consumo de material es un objetivo secundario. Es por ello, que los conectores mecánicos se utilizan para unir las barras de refuerzo de gran diámetro (25-40 mm) en un gran número de países, principalmente Gran Bretaña, Estados Unidos y Alemania (D'yachkov, Devyatov, & Vershinin, 2012). En Colombia existen empresas que comercializan estos productos.

2.1 Tipos de empalmes mecánicos

Los empalmes mecánicos se clasifican según el tipo de carga que actúa sobre el empalme:

- *Empalme mecánico Tipo 1:* son aquellos utilizados cuando no se esperan deformaciones inelásticas o esfuerzos de tensión elevados debidos a cargas sísmicas. Se pueden usar en pórticos asísmicos especiales o muros estructurales especiales (Vargas Fernández, 2015).
- *Empalme mecánico Tipo 2:* han demostrado a través de ensayos aceptados, que son capaces de resistir esfuerzos de tensión debidos a carga sísmica. Se pueden usar en cualquier localización (Vargas Fernández, 2015).

Se presentan situaciones donde se hace necesario utilizar empalmes mecánicos en lugar de los empalmes por traslape. Este tipo de empalmes se distinguen por ser una opción atractiva por proveer continuidad y anclaje a los aros o refuerzos en espiral continuos para proveer confinamiento en las columnas. Otra de las aplicaciones más importantes es ayudar a aliviar el congestionamiento y reducir la cantidad de acero en las zonas de empalme. De igual manera, estos resultan de gran ayuda en construcciones iniciadas y donde se necesite una extensión de

algún elemento. Así mismo, los empalmes mecánicos permite su uso en elementos de amarre en tensión, como por ejemplo tensores de arco, algo que no se podría lograr con un empalme por traslapo (Vargas Fernández, 2015).

2.2 Tipos de conectores mecánicos y casos para su uso

En general, se distinguen tres tipos básicos de conectores mecánicos:

- Conector mecánico de compresión, que también se conoce como conector mecánico de contacto en el extremo.
- Conector mecánico de tensión.
- Conector mecánico de tensión-compresión (ACI Committee 439, 1999).

Aunque el empalme mecánico es utilizado por las ventajas que ofrece respecto a otros sistemas de empalme, existen ciertas situaciones que hacen que su uso resulte más factible o más práctico. A continuación se detallan algunas de estas situaciones:

- En donde se utilizan varillas #14 (43 mm) y #18 (57 mm). Esto ocurre con mayor frecuencia en las columnas, losas de cimentación, puentes y otras estructuras fuertemente reforzadas. Los códigos no permiten empalmar por traslapo varillas #14 (43 mm) y #18 (57 mm), excepto con varillas #11 (35 mm) y varillas menores en compresión.
- Cuando el espaciamiento de las barras de refuerzo es insuficiente para permitir el traslapo de las barras. Esto generalmente ocurre en situaciones que requieren

grandes cantidades de refuerzo y el uso de barras más grandes, como en columnas muy cargadas.

- Cuando los requisitos en los códigos y especificaciones actuales para empalmes de traslapo de tensión dan como resultado longitudes de empalme muy largas, especialmente para tamaños de barras como #9 (28 mm), #10 (32) y #11 (35 mm), en acero grado 60 (420 MPa) o en barras de refuerzo recubiertas con epoxi. En estos casos los empalmes de traslapo pueden ser menos prácticos que las conexiones mecánicas.
- Cuando se utilizan “miembros de tensión”. No se permiten empalmes de traslapo de tensión en barras de refuerzo en miembros de amarre.
- Cuando la ubicación de las juntas de construcción y la provisión para la construcción futura dicta el uso de conexiones mecánicas para proporcionar continuidad a la tracción. Las conexiones mecánicas a menudo son preferibles a tener largas longitudes de barra que se proyectan desde la construcción de concreto existente. Un mínimo de una extensión de barra de 12 pulgadas (305 mm) proporciona una longitud suficiente para la aplicación de la mayoría de las conexiones mecánicas sin dañar el concreto existente durante la instalación. Si las conexiones mecánicas deben escalonarse, la extensión de la barra saliente debe ser mayor de 12 pulgadas (305 mm) (ACI Committee 439, 1999).

En cualquier caso los códigos de diseño, establecen claramente que el proyectista es responsable de las especificaciones, los tipos y las posiciones de los empalmes de refuerzo (McCormac & Brown, 2011).

2.3 Requisitos para evaluar el comportamiento de los conectores mecánicos

Los conectores mecánicos son únicos en el sentido de que no existen estándares en la industria, ni existen cálculos que el ingeniero pueda realizar para asegurarse que el conector puede desarrollar adecuadamente la carga requerida. Sin embargo, el fabricante del conector está en condiciones de garantizar que el conector cumplirá con los requisitos normativos vigentes (McCabe, 2000).

En Colombia los fabricantes de conectores mecánicos se basan en lo establecido en las normas NSR-10, ACI-318, ACI-439 y el Código Colombiano de Diseño de Puentes (Ramalza S.A.S., 2019). Estos códigos donde se reglamenta el uso de empalmes mecánicos tienden a ser muy similares entre sí, aunque pueden presentar requisitos adicionales según los requerimientos de cada solicitud. En general, todas las normas exigen que debe cumplirse el siguiente requisito: *“los empalmes mecánicos deben desarrollar por lo menos un 125% del esfuerzo de fluencia (f_y) del acero de la varilla”*. Este requisito tiene por objeto garantizar que el empalme sea capaz de desarrollar el límite elástico de la barra y que la fluencia ocurra en la varilla de refuerzo antes de la falla de la conexión mecánica. La incertidumbre asociada con el límite elástico real de las barras de refuerzo son grandes y, por lo tanto, debe haber un aumento en la resistencia requerida de estos empalmes mecánicos, especialmente porque no hay otras normas involucradas. El punto de rendimiento real en las barras de refuerzo puede exhibir un límite elástico de 25% o más por encima de los valores nominales de rendimiento (McCabe, 2000).

Para evaluar el comportamiento de cualquier conector mecánico deben realizarse los ensayos establecidos en la norma ASTM A1034/A1034M-10a, en la cual se indican la variedad de ensayos requeridos para una correcta evaluación de los conectores. Según esta norma se deben realizar los siguientes tipos de ensayos:

- **Ensayos de tensión:** Con este ensayo se mide el desempeño del empalme mecánico junto con dos barras de acero de refuerzo, cargando el espécimen en tensión hasta obtener su rotura. Este ensayo se basa específicamente en la norma ASTM A370.
- **Ensayo de compresión:** permite comprobar el desempeño conjunto de las barras empalmadas con el conector mecánico bajo una carga creciente de compresión. El espécimen es cargado en compresión hasta producir la falla o hasta que cierta carga en específico es alcanzada.
- **Ensayo de carga cíclica:** Se realiza para obtener el comportamiento del conjunto formado por conector y varillas empalmadas bajo cargas alternadas de compresión y tensión hasta que cierto número de ciclos es alcanzado. Este ensayo se utiliza para simular la capacidad del conjunto durante un sismo.
- **Ensayo de alto ciclo de fatiga:** En este ensayo se alternan cargas de tensión y compresión en ciclos aplicando cargas inferiores al esfuerzo de fluencias de las varillas de acero. Se finaliza el ensayo cuando se alcanza la falla del conjunto o hasta que se obtiene cierto número de ciclos definidos. Se busca simular el comportamiento de empalmes mecánicos en puentes o en otras estructuras sujetas a cargas cíclicas elásticas frecuentes.
- **Ensayo de deslizamiento:** Se emplea para estudiar el movimiento entre las barras de refuerzo dentro del dispositivo mecánico cuando es cargado en tensión.

- **Ensayo de baja temperatura:** se realiza para determinar el comportamiento del conjunto formado por las varillas de acero empalmadas con el conector mecánico a bajas temperaturas.
- **Ensayo combinado:** Se busca describir el comportamiento del conector y las varillas realizando combinaciones de los ensayos descritos anteriormente (Vargas Fernández, 2015) (ASTM, 2010).

La ASTM A1034/ A1034M-10a, señala los ensayos a realizar según el uso que vaya a tener el conector. En Colombia, el ensayo de tensión se realiza generalmente según lo indicado en la NTC-2289: Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto. Para el resto de ensayos se utiliza como referencia la NTC-3353: Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero. Los parámetros de referencia existentes para estos ensayos se adecuan a lo establecido en los respectivos códigos de diseño. Se efectúan estos ensayos en probetas o muestras que no están embebidas en concreto, por lo que no representan el comportamiento real del conjunto dentro de un elemento de concreto reforzado (Vargas Fernández, 2015).

La ACI-439, considera, además de lo establecido en las normas anteriormente expuestas, situaciones en las cuales pueda evitarse debilidades potenciales que puedan atribuirse directamente a los detalles específicos y/o materiales de una conexión mecánica; entre ellas se encuentran:

- En un elemento a flexión, la conexión mecánica no deberá tener como resultado una baja rigidez longitudinal efectiva del refuerzo, que viole las condiciones de deformación supuestas en el diseño del elemento.
- Donde deba anticiparse una deformación no elástica, como en las zonas de fluencia de las estructuras sísmicas, el dispositivo de conexión mecánica no debe introducir efectos de muesca que podrían causar la ruptura de la varilla en el dispositivo de conexión mecánica, antes de que la cedencia requerida pueda ocurrir en las varillas adyacentes.
- La selección de las conexiones mecánicas adecuadas deben considerar que los efectos de muesca, si se presentan, son más severos con cargas dinámicas, cargas de fatiga, y temperaturas frías.
- Donde la deformación potencial no elástica pueda ocurrir durante una excitación sísmica, el ensamble consistente del conector y las varillas de refuerzo conectadas, debe poseer una ductilidad adecuada, de manera que la falla se inicie en el concreto y no en el acero de refuerzo. La información del fabricante, así como la de la literatura respectiva, deben ser revisadas por el ingeniero cuando evalúe un conector mecánico para servicio, en donde sean posibles cambios de signos de grandes cargas (ACI Committee 439, 1999).

2.4 Aspectos generales para el uso de conectores mecánicos

Al momento de utilizar conectores mecánicos se deben considerar varios aspectos, entre ellos las características físicas del conector, los equipos requeridos para su instalación y sus

procedimientos, así como aquellos aspectos que puedan afectar el funcionamiento o diseño. A continuación se muestran las consideraciones más importantes a tener en cuenta para el uso de conectores mecánicos.

2.4.1 Espaciamiento y recubrimiento. Las distancias libres mínimas entre las varillas de refuerzo adyacentes se establecen en los reglamentos y en las especificaciones de diseño, sin embargo, ninguna indica los límites de separación libre para los conectores mecánicos, no obstante, la ACI-439-99, establece longitudes de separación mínima para algunos tipos de conectores, aunque estas longitudes están basadas en las recomendaciones dadas por los fabricantes de cada conector (ACI Committee 439, 1999).

En promedio, para conectores mecánicos “*sólo a compresión*” la separación entre conexiones adyacentes debe ser de $1.5d_b$ (1.5 veces diámetro nominal de la barra) y no menor a 38 mm, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1.

Espaciamiento para conectores mecánicos solo a compresión

Conexión adyacente	Camisa de acoplamiento de acero de tipo sólido	Camisa de acoplamiento de acero de tipo abrazadera	Camisa de acoplamiento rellena de acero	Camisa de acoplamiento con bloqueo de cuña
Rango de tamaño de varilla	#8 - #18	#7 - #18	#11 - #18	#7 - #18
Conecta diferentes tamaños de varilla	Sí	Sí	Sí	Sí
# 18	$1,5d_b$	38 mm	38 mm	38 mm
# 14	$1,5d_b$	38 mm	38 mm	38 mm
# 11	$1,5d_b$	38 mm	38 mm	38 mm

Nota: d_b es el diámetro de la barra de acero. Adaptada de ACI-439.

Para varillas a “*tensión-compresión*” los valores tienden a variar significativamente entre el tipo de conector a utilizar, en la tabla 2 se muestran las separaciones recomendadas por la ACI-439.

Tabla 2
Espaciamiento para conectores mecánicos a tensión-compresión

Conexión adyacente	Camisa de acoplamiento de acero forjada en frío	Camisa de acoplamiento forjada con cuerda en extremos actuando como cople	Camisa de acoplamiento de acero de extrusión	Camisa de acoplamiento de acero forjada en caliente	Camisa de acoplamiento llenada con mortero	Cople para varillas de refuerzo corrugadas con rosca	Camisa de acoplamiento llenada con acero	Cople de acero disminuido con rosca	Cople integralmente forjado con rosca alterada (upset) NC	Cople de tres piezas con rosca NC	Camisa de acoplamiento de acero con cuña
Rango de tamaño de varilla	#3 - #18	#3 - #18	#5 - #18	#5 - #18	#5 - #18	#6 - #18	#4 - #18	#4 - #18	#4 - #11	#4 - #18	#3 - #7
Conecta diferentes tamaños de varilla	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
# 18	70 mm	44 mm	150 mm	1.5 d_b	120 mm	1.5 d_b	1.5 d_b	38 mm	NA	38 mm	NA
# 14	70 mm	25 mm	110 mm	1.5 d_b	100 mm	1.5 d_b	1.5 d_b	38 mm	NA	25 mm	NA
# 11	50 mm	25 mm	110 mm	1.5 d_b	90 mm	1.5 d_b	1.5 d_b	38 mm	38 mm	25 mm	NA

Nota: d_b es el diámetro de la barra. Adaptada de ACI-439.

Es de aclararse, que muchas de las separaciones entre conectores mecánicos están estipuladas por los fabricantes en sus respectivas especificaciones, y quedan sujetas al criterio y consideraciones de los ingenieros en cada proyecto. Los conectores mostrados en la tabla 1 y 2, se encuentran disponibles en el mercado norteamericano y pueden o no encontrarse en otros países.

Estos límites de separación pueden ser un factor en la selección y colocación del conector mecánico. Debe conocerse el diámetro exterior del conector, pues conociendo su diámetro se puede tomar una decisión sobre si los conectores deben quedar alternados con base en el espacio libre requerido. Generalmente las uniones de cualquier tipo de empalme son alternadas o escalonadas, pero algunas investigaciones, sugieren que en el caso de los conectores mecánicos no es necesario este escalonamiento. Sin embargo, dependiendo de las revisiones futuras del reglamento, la longitud alternada o escalonada mínima debe ser especificada por el ingeniero en congruencia con los requisitos del reglamento aplicable. El tamaño y la operación del equipo

requerido para realizar los empalmes mecánicos pueden determinar un espaciamiento mínimo o un modelo para alternar o escalonar las varillas (ACI Committee 439, 1999).

Los conectores mecánicos suelen tener un diámetro exterior sustancialmente mayor que el de las varillas de refuerzo. Debe darse consideración especial al recubrimiento mínimo del concreto de los estribos, anillos, o espirales en estas ubicaciones de los empalmes. En muchos casos, la disposición de los estribos o de los anillos adyacentes a los conectores mecánicos, o la ubicación del empalme mismo, pueden ser ajustados para evitar un recubrimiento del concreto reducido. Sin embargo, donde el espaciamiento cerrado requerido de estribos y anillos, necesita su colocación sobre las camisas de acoplamiento, puede ser necesario diseñar un mayor recubrimiento sobre el refuerzo longitudinal, de manera que los estribos y/o anillos que acompañan a los conectores mecánicos tengan un recubrimiento adecuado. Idealmente, el refuerzo de confinamiento tendría mayores dimensiones en un conector, pero eso no es generalmente lo usual. (ACI Committee 439, 1999).

2.4.2 Correspondencia entre las alineaciones en los extremos, preparación de los extremos de las varillas, corrugados especiales de las varillas, y equipo. El ingeniero debe tener en cuenta cualesquiera preparaciones especiales en los extremos requeridas para las varillas en algún método dado del conector mecánico, o para ciertos acoplamientos. Por ejemplo, se requiere para las uniones de soporte de extremo, que los extremos de las varillas sean cortados con una toleración menor a 1,5 grados de la escuadra con respecto al eje longitudinal. Por definición, los coples tienen rosca, y en algunos requieren roscas iguales en los extremos de las varillas. Un dispositivo de conexión mecánica requiere varillas de refuerzo con corrugaciones especiales en forma de rosca. En todas las conexiones mecánicas, es importante tener el

dispositivo de conexión mecánica bien alineado con el eje de ésta longitudinal, de manera que la varilla no esté propensa a grandes oscilaciones cuando sea girada en un ensamble en la obra (ACI Committee 439, 1999).

El fabricante de las varillas de refuerzo debe ser acertado con respecto a cualesquiera preparaciones especiales de extremo o de rosca. Los requisitos especiales pueden requerir el uso de máquinas de formación de roscas de extremo, o herramientas y equipos especiales en el lugar de la construcción. Los requisitos de disponibilidad o de entrega para varillas de refuerzo con un patrón especial de corrugado, y para el equipo y las herramientas requeridas, deben determinarse para el proyecto específico antes de que se tomen las decisiones finales. Con relación a esto, una revisión de los extremos de las varillas es algunas veces aconsejable antes de proceder a efectuar ciertas conexiones mecánicas. El fabricante de conexiones mecánicas puede asesorar a este respecto (ACI Committee 439, 1999).

2.4.3 Varillas de refuerzo recubiertas. Las varillas de refuerzo pueden ser recubiertas con epóxico o con zinc (galvanizadas) para usarse como un sistema de protección contra la corrosión. Las conexiones mecánicas de varillas de refuerzo recubiertas se hacen con dispositivos de conexión mecánica patentados, en forma similar que para varillas no recubiertas. Para instalar adecuadamente algunos tipos de camisas de acoplamiento en varillas recubiertas, la capa de recubrimiento tiene que ser totalmente removida de los extremos de las varillas en toda la longitud de la camisa y una distancia corta, quizás 5 cm o más, fuera de los extremos de la camisa. (ACI Committee 439, 1999).

2.4.4 Montaje en el campo. Hay una diferencia considerable en el tiempo y el equipo requeridos para instalar diferentes conectores mecánicos. Por lo tanto, es imperativo coordinar el procedimiento de programación y de montaje en la obra y del procedimiento de selección y de instalación de las conexiones mecánicas. Para algunos proyectos, el ingeniero puede encontrar apropiado controlar los tipos de dispositivos de conexión mecánica a utilizar. Igualmente, el método de construcción puede determinar los tipos de dispositivos de conexiones mecánicas que puedan ser más fácilmente utilizables. Es importante que los requisitos únicos de cualquier dispositivo de conexión mecánica seleccionado sean analizados por todas las partes antes de comenzar la construcción.

2.5 Conectores mecánicos disponibles en el mercado

Existen diferentes conectores mecánicos según la naturaleza de la unión de las varillas, entre estos están los conectores que se presionan mecánicamente a las barras de acero, dispositivos con rosca en la barra, conectores que se presionan con tornillos, algunos especiales con tendencia antisísmica, entre otros (González & Cuevas Florián, 2018).

Cada uno de estos conectores brinda ciertas ventajas al momento de su instalación, y su uso puede estar condicionado por ciertos motivos, como lo son la facilidad para acceder al conector, el tipo de estructura a construir, la facilidad de instalación, el precio de los conectores, o simplemente a preferencias del diseñador o constructor.

Como ya se mencionó anteriormente, existen diferentes tipos de empalmes dependiendo de la naturaleza de la unión. Distintas empresas se encargan de fabricar y distribuir estos conectores según las demandas del sector constructivo. A continuación se detallaran algunos de los sistemas de conexión mecánica más empleados en la actualidad.

2.5.1 Conector con rosca cónica o ahusada. Estos tienen unas roscas interiores ahusadas, ver figura 5. Requieren roscas ahusadas en los extremos de las varillas de refuerzo, que sean compatibles con las roscas ahusadas del cople. La rosca ahusada elimina el posible daño a la rosca, o el atoramiento antes de que se haya completado totalmente el ajuste de la rosca (ACI Committee 439, 1999).



Figura 5. Conector con rosca cónica o ahusada

Fuente: Arriagada, 2007, Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 14.

Este tipo de conector constituye un sistema de empalme mecánico con rosca cónica que asegura una conexión cerrada positiva, proveyendo continuidad e integridad estructurales a construcciones en hormigón armado. Las barras empalmadas se comportan como barras de refuerzo continuas ofreciendo buena resistencia en tensión, compresión y aplicaciones con esfuerzos invertidos. El diseño cónico de la rosca auto-alineado asegura facilidad de instalación,

consistencia de comportamiento y durabilidad. También desarrolla una resistencia a tensión mayor que la de un empalme por traslapo, proveyendo una transferencia total de las cargas a través del manguito (Arriagada Meza, 2007).

2.5.2 Conector separado con roscas estándar. Se distingue por ser el conector más utilizado para eliminar las barras salientes en caso de obras construidas por fases progresivas o en caso de aberturas temporales.

Su diseño se caracteriza por ser de rosca cónica y fabricado con una protección de la rosca unida a una placa, para una aplicación sencilla y segura al encofrado, como puede observarse en la figura 6. Este empalme soluciona el viejo problema de conectar las barras al encofrado. Cuando con un tope interno a la mitad de su longitud que garantiza que la varilla de refuerzo esté roscada desde cada extremo a la profundidad apropiada. La placa cuadrada de base se estampa o se suelda a uno de los extremos del cople. Cuando se vayan a conectar mecánicamente dos diámetros diferentes del refuerzo, mediante pedidos especiales se pueden obtener coples de transición con tamaños de rosca diferentes a cada lado (Arriagada Meza, 2007).



Figura 6. Cople o conector separado con rosca estándar

Fuente: Arriagada, 2007. *Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción*, p. 15.

2.5.3 Conector mecánico relleno de acero. Se recomienda para aplicaciones de sólo compresión. Existen disponibles para conectar varillas de varios diámetros y hacer conexiones mecánicas de transición para diferentes tamaños de varillas con insertos especiales, variando hasta en dos tamaños, por ejemplo, la #11 (35 mm) a # 18 (57 mm). Los extremos de las varillas no requieren preparación especial; sin embargo, se recomienda una revisión del extremo de varilla para evitar problemas de ajuste en el campo entre el interior de la camisa y la deformación más sobresaliente de una varilla. Los extremos pueden cizallarse o cortarse con flama, porque el metal fundido del relleno (acero) llena el espacio entre los extremos de las varillas, para garantizar el contacto. Aunque se hace para aplicaciones sólo a compresión, este conector, por su naturaleza, es capaz de desarrollar alguna resistencia a la tensión, si bien, no se recomienda para resistir cargas significativas de ésta. Las varillas pueden conectarse en posición vertical, horizontal y diagonal. Este sistema de empalme ofrece consistencia, versatilidad y flexibilidad, utilizándose para aquellos casos en que sea necesario una determinada resistencia y solidez, puede observarse en la figura 7. Este empalme es el más utilizado a escala mundial para instalaciones nucleares, además se utiliza por no tener la exigencia de una preparación particular de las extremidades de las barras. Este sistema utiliza la superficie de su pared interna surcada combinada a las nervaduras de la barra (ACI Committee 439, 1999).



Figura 7. Conector mecánico relleno de acero

Fuente: Arriagada, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 17.

2.5.4 Conector estampado en frío. Consiste en un tubo de acero sin costura, que se desliza sobre los extremos de dos varillas de refuerzo y se deforma con el perfil de ésta, para producir un bloqueo mecánico, como se observa en la figura 8. Pueden conectarse entre sí varillas del #3 (9,5) al #18 (57 mm), además de otras varillas de ciertos diámetros diferentes.

Es un sistema de empalme ideal para prefabricados por estar diseñado para dar una continuidad estructural entre las barras de las armaduras, donde contribuye a eliminar las líneas

Antiestéticas entre los elementos estructurales con resultados arquitectónicamente muy válidos. Estos conectores están diseñados para mantener integridad estructural entre elementos estructurales prefabricados como columnas, vigas y paredes. Para su instalación en obra se emplean prensas hidráulicas provistas de un juego removible de troqueles de dos piezas. El juego de troqueles deforma uniformemente la camisa de acoplamiento en la varilla de refuerzo, en una serie de presiones traslapadas a lo largo de su longitud. No se requiere una preparación especial en el extremo de las varillas, de manera que estos pueden cizallarse, aserrarse, o ser cortados con flama; sin embargo, se recomienda una inspección del extremo de las varillas. Éstas pueden conectarse en cualquier orientación, puesto que no se requiere una posición especial de la prensa alrededor de la varilla (Arriagada Meza, 2007).



Figura 8. Conector estampado en frío

Fuente: Arriagada, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 19.

2.5.5 Conector mecánico de acero con cuña. Está diseñado principalmente para aplicaciones de empalme entre barras en obra y su aplicación es muy sencilla y rápida. Este empalme mecánico (ver figura 9) permite la eliminación de los costos y peligros de demolición de secciones de hormigón. Es un sistema extremadamente eficaz para ampliar viaductos, para mejorar estructuras en zonas sísmicas y para extensiones de pilares. El conector mecánico de acero tiene una sección transversal en forma ovalada, la cual permite el traslape de dos varillas de refuerzo con el mismo diámetro en el conector. Cada varilla se prolonga hacia afuera de la camisa aproximadamente un diámetro de la varilla. Después que el conector mecánico quede en su posición correcta, se instala un pasador redondo en forma de cuña a través de un agujero en la cara plana de la camisa. La cuña pasa entre las varillas de refuerzo y se extiende a través del agujero al lado opuesto de la inserción. El pasador en forma de cuña se introduce mediante un martinete hidráulico operado a mano. Para conectar varillas recubiertas con epóxico se requieren dos coples, uno delante del otro. Este conector está clasificado actualmente solamente para tensión (ACI Committee 439, 1999).



Figura 9. Conector mecánico de acero con cuña

Fuente: Arriagada, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 21.

2.5.6 Conector mecánico de acero tipo fleje. Es el mejor sistema para aplicaciones solo a compresión. Estas camisas de acoplamiento son aproximadamente la mitad de un casco cilíndrico con una pestaña doblada en un lado y ranuras en el otro lado. Tirantes en forma de L se ajustan a través de las ranuras de la camisa de acoplamiento y se sujetan con pernos a la pestaña. Este empalme se ha diseñado para una rápida instalación y una inspección sencilla, solamente utilizando las extremidades de las barras escuadradas, transfiriendo las cargas de compresión mediante una alineación correcta de las cabezas de las barras, como puede observarse en la figura 10 (Arriagada Meza, 2007).



Figura 10. Conector mecánico de acero tipo fleje

Fuente: Arriagada, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 23.

2.5.7 Terminales o barras con cabeza. Es un anclaje con rosca cónica que se pone a la extremidad de una barra de armadura para realizar un anclaje más eficaz que de un anclaje hecho a través de una barra doblada, como puede observarse en la figura 11. Este sistema simplifica el hueco de las armaduras, reduce la congestión y mejora la integridad estructural. Por utilizar los principios de la teoría de distribución cónica de la carga, está diseñado para su utilización con barras de cada diámetro (12 mm a 57 mm) (Arriagada Meza, 2007).



Figura 11. Terminales o barras con cabeza

Fuente: Arriagada, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p. 24.

2.5.8 Conector mecánico roscado. Unen dos barras de igual diámetro. Requieren la preparación de los extremos de las varillas a empalmar (Ramalza S.A.S., 2019).



Figura 12. Conector mecánico roscado

Fuente: Ramalza S.A.S., 2019. Lista de precios general de conectores mecánicos, p.2.

2.5.9 Conector mecánico roscado de transición. Unen dos barras de diferente diámetro (Ramalza S.A.S., 2019).



Figura 13. Conector mecánico roscado de transición
Fuente: Ramalza S.A.S., 2019. Lista de precios general de conectores mecánicos, p.3.

2.5.10 Conector mecánico extruido. Unen dos barras del mismo diámetro sin roscar. Requieren de equipo especial para su instalación (Ramalza S.A.S., 2019).



Figura 14. Conector mecánico extruido
Fuente: Ramalza S.A.S., 2019. Lista de precios general de conectores mecánicos, p.4.

2.5.11 Conector mecánico de tornillo. Estos conectores permiten una sencilla instalación en obra, ya que no se requiere cortar, preparar ni reducir los extremos de las varillas. Se instalan con una llave de tuercas estándar o mediante una llave de impacto según el diámetro del conector. Las cabezas de los pernos se cortarán una vez alcanzada el apriete correcto de instalación, lo que permite una inspección visual (Arriagada Meza, 2007).



Figura 15. Conector mecánico de tornillo

Fuente: Ramalza S.A.S., 2019. Lista de precios general de conectores mecánicos, p.4.

En el apéndice A, se muestran las características de 3 conectores mecánicos que fueron empleados en la investigación titulada: *Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2)*. Es de aclarar que cada empresa se encarga de nombrar los distintos conectores de forma diferente, por lo que un mismo tipo de conector puede encontrarse en el mercado con diferentes denominaciones, sin embargo, sus características principales resultan en la mayoría de los casos idénticas.

2.6 Ejemplo de instalación de un conector mecánico

Como se mencionó anteriormente, cada conector mecánico requiere de un proceso de instalación diferente, que demanda a su vez cierto tiempo y equipos para cada caso, por lo que resulta muy extenso a bordar en detalle cómo se instala cada conector mecánico. Por tal razón, a continuación se muestran los procesos generalmente efectuados para instalar un conector mecánico de rosca, según las indicaciones del fabricante y de la empresa distribuidora del producto.

Las dimensiones del conector mecánico roscado estándar dependen del diámetro nominal de la varilla de refuerzo a empalmar. En la figura 16 se muestra el modelo del conector que permite unir varillas de igual diámetro y en la tabla 3 se muestran sus detalles más importantes, indicando las dimensiones de A, B, C, D y E (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).

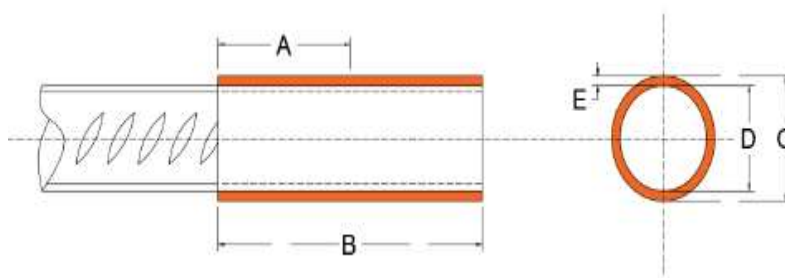


Figura 16. Conector mecánico roscado estándar

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1. p.4.

Tabla 3.

Características del conector mecánico roscado estándar

DIÁMETRO NOMINAL		DIMENSIÓN									
		A		B		C		D		E	
No.	Pulg	Pulg	mm	Pulg.	mm	Pulg.	m	Pulg	mm	Pulg.	mm
5	5/8	0,89	22,50	1,77	45	0,96	24,5	0,55	13,90	0,21	5,30
6	3/4	1,22	31,00	2,44	62	1,16	29,4	0,70	17,90	0,23	5,75
7	7/8	1,32	33,50	2,64	67	1,24	31,5	0,79	20,10	0,22	5,70
8	1	1,45	36,75	2,89	73,5	1,50	38,2	0,89	22,70	0,31	7,75
10	1,25	1,57	40,00	3,15	80	1,90	48,2	1,18	30,00	0,36	9,10

Nota: Dimensiones nominales del conector. Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017.

Determinado el diámetro de varilla a empalmar, el primer paso consiste en hacer el figurado en forma de rosca en las extremidades de las barras de acero. Este proceso se puede hacer directamente en una planta de figurado de acero que cuente con el equipo requerido, o en la obra roscando según la necesidad del proyecto con maquinaria de menor tamaño, como se muestra en la figura 17 (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 17. Figurado de las extremidades de las barras de acero

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1, p.12.

Después que las extremidades de las barras cuenten con sus respectivas roscas, se procede a enroscar el conector mecánico. Este proceso se puede hacer directamente en las plantas de figurado, o por el contrario, realizarse en obra con herramienta menor, especialmente con una llave adecuada. Hay que recalcar que las extremidades al momento de la instalación del conector deben encontrarse totalmente limpias, libres de corrosión e impurezas. De esta manera, la instalación se realiza acoplando el conector manualmente hasta llegar al tope y posteriormente se ajusta con la llave empleada, como se muestra en la figura 18 (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 18. Acoplamiento del conector en la barra de acero

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1, p.14.

Un aspecto fundamental al instalar este tipo de conector, es que debe garantizarse que en el roscado inicial del conector, la primera barra entre hasta la mitad del conector, para no quitarle longitud efectiva de roscado a la siguiente barra, que en conjunto conforman el empalme mecánico. Para instalar la otra barra, se utilizan las mismas herramientas buscando garantizar una correcta unión, como puede observarse en la figura 19.



Figura 19. Acoplamiento de la segunda barra de acero al conector

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1, p.14.

Es común que en obra el roscado de la siguiente barra de acero normalmente se realice cuando la primera ya se encuentra embebida en el concreto, por lo que es conveniente proteger la rosca del conector por medio de tapones para que no se llene de concreto y tengan que ser reemplazados, como se muestra en la figura 20. Al momento de instalar la segunda barra

simplemente se retira la conexión colocada en el conector (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 20. Protección del conector roscado

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano., 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1, p.14.

La eficiencia del empalme mecánico depende de los correctos procedimientos en los procesos de instalación como de producción en planta, siendo responsabilidad del residente de obra o el supervisor velar por el cumplimiento de los procedimientos básicos que garanticen su correcto uso (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).

La empresa Ramalza S.A.S. productora y distribuidora de este tipo de conectores, ofrece el servicio de roscado para los extremos de las varillas de acero, pero deben tenerse en cuenta las siguientes condiciones:

- La energía 220 V trifásica debe estar o no más de 4 mts de la máquina roscadora.
- La producción diaria promedio por máquina es de 300 roscas/día.
- La obra suministrará soportes metálicos o de madera para ubicar las barras a roscar; el número mínimo es dos por máquina y si la barra supera los 6 metros, se necesitan

por lo menos cuatro. La altura de los soportes debe estar al nivel de la máquina; el ancho mínimo es de 80 cm, pero esta medida puede ser mayor dependiendo del tipo de varilla a roscar y las condiciones de trabajo.

- La obra suministrara uno o dos ayudantes de manera permanente durante la actividad del roscado, el cual firmara la circular informativa en donde se instruye sobre las políticas de seguridad para la operación a realizar durante el roscado.
- Se necesita un espacio mínimo de 4 m² para la ubicación de la máquina y movimiento del operario alrededor de ella; este lugar debe estar cubierto. Adicionalmente, debe haber espacio suficiente para la ubicación de los soportes y las barras, de acuerdo a su longitud.
- El sitio para ubicar la maquina debe estar nivelado para proporcionarle estabilidad.
- Tanto el acero, la corriente y el ayudante, deben estar disponibles de manera inmediata para iniciar actividades, de lo contrario se puede retirar máquina y operario. Cabe resaltar que la obra debe asumir el pago del día del operario que será de \$100.000 y el transporte de la máquina cuyo costo es de \$220.000, si y solo si, no tienen las condiciones mínimas para iniciar actividades. La obra no podrá impedir el retiro de la máquina y salida de operario en ausencia de las condiciones para iniciar trabajos.
- En caso de que la cantidad de varillas a roscar en el día sea menor a 200, se cobrar \$100.000 como mínimo por visita de operario, en caso de requerir máquina se debe cancelar siempre el costo del flete.
- Para autorización de horas extras el operario debe haber realizado como mínimo 300 roscas en su jornada laboral, de lo contrario la obra cancelara la suma de

\$60.000 por horas adicionales de 4:30 a 9:30 de la noches, si se requiere en domingo o festivo la obra pagara \$100.000 por jornada laboral.

- Si la máquina roscadora, es movida por personal ajeno a la empresa y se presentasen daños, la obra responderá por las reparaciones a que hubiese lugar.
- La obra se compromete a pagar todos los cobros generados por daños, roscas, transportes y demás presentados y soportados con firma de funcionario de la obra, así no estén dentro de la orden de compra o contrato.

Capítulo 3. Comportamiento de los conectores mecánicos

En el capítulo 2 se detallaron los ensayos a que deben someterse los conectores mecánicos, los cuales se encuentran indicados en la norma ASTM A1034/A1034M-10a, con el fin de garantizar un funcionamiento idóneo y que cumplan con lo establecido en las normas respectivas, siendo los fabricantes quienes se encargan de llevar a cabo todos estos ensayos. Sin embargo, es común que se realicen algunos de los ensayos en universidades, instituciones o donde se cuente con los equipos necesarios, ya sea con un carácter investigativo o como una solicitud de una empresa o un particular para evaluar el comportamiento de cierto tipo de conector, dar recomendaciones sobre su uso o verificar la información emitida por las empresas vendedoras y distribuidoras de estos productos.

En este capítulo se recopilan algunas de las investigaciones realizadas hasta la fecha sobre el comportamiento de los conectores mecánicos y los resultados en ellos obtenidos. Es de resaltar que el ensayo comúnmente más realizado es el ensayo de tensión, pues debido a que la principal función del acero es soportar los esfuerzos de tensión o tracción, es la resistencia más evaluada.

3.1 Ensayo de tensión en barras de acero

El ensayo de tensión, hace referencia a aquellos ensayos donde probetas de acero son sometidas a una carga monoaxial gradualmente creciente, es decir, estática, hasta que ocurre la falla. La velocidad de la carga a aplicar oscila entre 1,15 y 11,5 MPa/seg, dependiendo de la sección transversal de la probeta seleccionada. Generalmente en el ensayo de tensión simple se

sujetan los extremos opuestos de la pieza de material para buscar su alargamiento. Excepto de ciertas piezas de ensayo arbitrariamente formadas, las probetas son cilíndricas o prismáticas en su forma y de sección transversalmente constante a lo largo del tramo dentro del cual las mediciones se toman. (Fuentes Espinoza, 1982).

Cuando se llevan a cabo pertinentemente en probetas adecuadas, este ensayo, sobre todos los demás, permiten una evaluación certera de las propiedades mecánicas fundamentales con el diseño como finalidad, aunque debe advertirse que las propiedades tensionales no son necesariamente suficientes para permitir la predicción del desempeño de los materiales bajo todas las condiciones de carga. Si se efectúan métodos de ensayo normales, los resultados constituyen criterios adecuados de la calidad de los materiales por medio de los cuales se ha logrado acumular suficiente experiencia para proveer la certeza de que un nivel de calidad dado significa un comportamiento satisfactorio en servicio (Fuentes Espinoza, 1982).

Si los ensayos son correctamente efectuado en partes representativas pueden ser valiosos para indicar directamente el desempeño de tales partes bajo cargas en servicio. Los ensayos adecuados de probetas o partes montadas sometidas a tratamientos específicos pueden ser útiles para evaluar cuantitativamente el efecto de estos tratamientos (Fuentes Espinoza, 1982).

Es de resaltar, que las especificaciones de prueba para conectores mecánicos varían dependiendo de la autoridad que emite las especificaciones, el país y la aplicación del empalme. Cuando se consideran los empalmes mecánicos para su uso, el diseñador debe determinar los

criterios de rendimiento requeridos del conector y consultar con los fabricantes que le ofrecen experiencia la selección de un sistema adecuado y económico (Connah, 2013).

3.2 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad de Kansas, Estados Unidos

Investigación desarrollada en la Universidad de Kansas, Estados Unidos, con el fin de determinar qué tan bien los sistemas de empalme mecánico comerciales responderían a cargas sísmicas simuladas, especialmente en aquellas barras de acero de sobrerresistencia, es decir, aquellas que superan el mínimo de rendimiento de 420 MPa en un 25% o incluso más (Mccabe, 2000).

Las pruebas abordaron los sistemas de empalme mecánico ante la acción de cargas cíclicas severas, como la carga lateral de terremoto, en el que las demandas inelásticas son significativas y se realizan sobre los miembros y las conexiones. En estos dos casos, la capacidad de mantener la capacidad de carga hasta bien entrado el régimen inelástico es el problema y no puede ser satisfecha por criterios de solo resistencia (Mccabe, 2000).

Para realizar los ensayos seleccionaron pruebas in-aire, que aunque no están preciso como pruebas in-miembro, proporcionan un conservador límite inferior para el rendimiento. Se limitaron las pruebas a barras de 25 mm de diámetro, con un rendimiento nominal de 420 MPa. Las probetas tenían una longitud de 20 diámetros, o aproximadamente 500 mm. El procedimiento consistió en tres pruebas separadas: prueba de tensión, ensayo de alto ciclo de fatiga y ensayo de

carga cíclica. Se tomó un nivel de deformación del 4% para todas las barras, según lo indicado en la ACI-439 (McCabe, 2000).

La primera prueba realizada sobre el conjunto de empalmes fue el ensayo de tensión, las probetas se cargaban a tensión a través del 4% de deformación hasta la rotura. De esta forma se obtenía el límite elástico del acero. Cada prueba se realizó de forma similar a lo indicado en la ASTM A370 usando tasas de carga entre 0,45 kN/min como mínimo y 445 kN/min como máximo. Las tasas de carga objetivo se mantuvieron a aproximadamente 265 kN/min (McCabe, 2000).

La segunda prueba consistió en el ensayo de alto ciclo de fatiga, donde las probetas se iniciaban en condiciones iniciales de deformación y carga cero. El conjunto se cargó igual que en el ensayo de tensión hasta alcanzar una deformación del 2%. En este punto la carga se invertía y se descargaba a carga cero con una carga de compresión de 44,5 kN o 87,6 MPa. El propósito de comprimir el conjunto de empalme era asegurar que el empalme en sí mismo fuera sometido a la descarga completa de la tensión antes de ser sometida al siguiente ciclo de carga de tensión. Después de ser comprimido, las probetas eran cicladas cuatro veces bajo una tensión del 2% de deformación. Completados ciclos al 2% de deformación, se procedía a aumentar la deformación al 2,5%, 3% y 3,5%. En cada nivel de deformación, el ciclo de prueba se repetía 4 veces. Después de la descarga final en el 3,5% de deformación el conjunto se tensionaba hasta la rotura (McCabe, 2000).

Por último, se sometió un conjunto de probetas al ensayo de carga cíclica, donde eran cargadas desde tensión cero hasta el 4% de deformación en el primer ciclo de carga. Al alcanzar el porcentaje de deformación definido el conjunto era descargado a tensión cero con una carga de compresión de 44,5 kN o 87,5 MPa. Este ciclo se repetía un total de 16 veces. Después eran tensionadas hasta la rotura (McCabe, 2000).

Realizadas los ensayos, se concluyó que el uso de los empalmes mecánicos como alternativa a los empalmes traslapados es viable en muchas situaciones, pues claramente reducen el espacio ocupado por el empalme, son capaces de conectarse eficazmente entre barras de refuerzos juntas y son mucho más resistentes que las barras de acero (McCabe, 2000).

3.3 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Estatal de Moscú, Rusia

Debido a la difusión del uso del empalme mecánico en varillas de acero con grandes diámetros (25-40 mm) en un gran número de países, en especial Gran Bretaña, Estados Unidos y Alemania, se decidió realizar una revisión en la Universidad Estatal de Moscú sobre la literatura existente hasta la fecha sobre los conectores mecánicos, además de realizar ensayos de tensión y fatiga. Esto con el fin de aumentar los datos experimentales para los códigos y normas existentes (D'yachkov, Devyatov, & Vershinin, 2012).

De esta manera, seleccionaron 986 conectores mecánicos de diferentes características para someterlos a ensayos de cargas estáticas y dinámicas, donde evaluaron la influencia mecánica de la de formabilidad entre la conexión a las barras, la resistencia al agrietamiento y la de

formabilidad de estructuras de hormigón armado ante ensayos de compresión de columnas cargados axialmente y excéntricamente (D'yachkov, Devyatov, & Vershinin, 2012).

Al final, concluyeron que los conectores mecánicos como sistema de empalme resulta ser una técnica de conexión de barras de refuerzo duradero, eficiente y eficaz, siempre y cuando se cumpla con lo establecido en las respectivas normas y códigos de diseño (D'yachkov, Devyatov, & Vershinin, 2012).

3.4 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad de Costa Rica

El uso de conectores mecánicos ha empezado a expandirse en algunos proyectos llevados a cabo en Costa Rica. Por tal motivo, la Universidad de Costa Rica desarrolló ensayos para determinar el comportamiento de los conectores mecánicos disponibles en el mercado de este país centroamericano. Los tres tipos de conectores mecánicos usados se muestran en el apéndice A (Vargas Fernández, 2015).

Inicialmente efectuaron ensayos de tensión en un total de nueve probetas de varillas de acero, con el fin de obtener los esfuerzos de fluencia y de rotura del acero que se utilizó y así poder corroborar con los ensayos a tensión de los empalmes mecánicos si el desempeño de los conectores mecánicos era el deseado. Así mismo, se calculó la elongación de la barra de acero, para ello realizaron marcas de 200 mm de longitud antes de realizar el ensayo. En la figura 21 se

muestran las probetas después de aplicar el ensayo de tensión y sufrir la rotura (Vargas Fernández, 2015).



Figura 21. Probetas de acero después de sufrir la rotura en el ensayo de tensión.
Fuente: Vargas Fernández, 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.47.

Realizado los ensayos en las probetas de acero, se procedió a realizar el ensayo de tensión en los empalmes mecánicos, 4 probetas por cada tipo de conector mecánico, en la figura 22 se observan las probetas después de efectuarse el ensayo. Se obtuvieron los esfuerzos de fluencia y los esfuerzos de rotura (Vargas Fernández, 2015).



Figura 22. Empalmes mecánicos elaborados para el ensayo de tensión.
Fuente: Vargas Fernández, 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.58.

De esta manera, se pudo concluir con la investigación que los conectores mecánicos que se utilizaron para elaborar los empalmes tipo 2, cumplían con el requisito de ser capaces de desarrollar la totalidad de los esfuerzos de las barras de refuerzo utilizadas, que en este caso correspondía al 125% del esfuerzo de fluencia de las barras, como lo indican los códigos. Por otra parte se logrón concluir que los conectores mecánicos usado cumplen a cabalidad su objetivo, que es ayudar a proporción una unión entre dos barras de refuerzo haciéndolas funcionar como si fuesen una barra de acero continua sin perjudicar su resistencia (Vargas Fernández, 2015).

3.5 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Distrital

Francisco José de Caldas, Colombia

Dado que en Colombia actualmente el uso de empalmes mecánicos viene tomando cada vez más fuerza y es un proceso relativamente nuevo, se carece de una adecuada divulgación técnica. El objetivo de esta investigación era determinar si los empalmes mecánicos roscados comerciales en Colombia cumplen con los criterios y requisitos técnicos mínimos descritos en la NSR-10 para su uso en edificaciones (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).

Para verificar este requisito, tomaron 30 probetas de acero con diámetro de 15,75 mm o No. 5 empalmadas con conectores mecánicos roscados y fueron sometidas a ensayos de tensión hasta la rotura de las probetas, como se observa en la figura 23 (Alvis Foncesa & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 23. Probetas con empalme después de la falla a tracción
Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, p.30.

Después tomaron otro conjunto de 30 probetas de acero con el mismo diámetro pero sin empalme mecánico y se efectuó el mismo ensayo hasta la rotura, como se observa en la figura 24 (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 24. Probetas sin empalme después de la falla a tracción
Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones. 2017, p.37.

Con estos ensayos, se concluyó que desde el punto de vista del comportamiento mecánico de los empalmes unidos con conectores roscados, los resultados son satisfactorios, ya que con un

universo de 30 probetas en total de un mismo lote de acero, se evidencia un coeficiente de variación cercano al 3% que comparado con el alto rango entre el límite mínimo y máximo de resistencia a la fluencia que ordena la norma (25% aproximadamente) es bueno, es decir, los ensayos demuestran que es confiable la utilización de este sistema en la construcción de obras (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).

3.6 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, República Dominicana

República Dominicana poco a poco ha ido introduciendo nuevos sistemas y métodos constructivos para abastecer las necesidades y exigencias que su actualidad demanda. Los empalmes mecánicos, han surgido debido a que con el pasar de los años las construcciones civiles se han ido desarrollando en el entorno moderno generando obras de gran envergadura, como lo son la construcción de grandes torres con elevado número de pisos. Con esta investigación se estudió la funcionalidad y resistencia de los empalmes mecánicos (González & Cuevas Florián, 2018).

Para llevar a cabo el estudio se realizaron ensayos a tensión, con barras de acero comerciales grado 60, No. 6 y No. 8, debido a que en este país solo hay conectores mecánicos para estos diámetros. El ensayo de tensión se llevó a cabo en un laboratorio particular llamado Atteco en Santo Domingo, pues esta universidad carece de una máquina para efectuar ensayos a tensión. En la figura 25 se muestra una de las probetas ensayadas (González & Cuevas Florián, 2018).



Figura 25. Ensayo de las probetas de acero empalmadas con conectores mecánicos
Fuente: Gonzáles & Cuevas Florián, 2018. Estudio comparativo entre empalmes por traslape y empalmes mecánicos utilizados en elementos de hormigón armado, p.49.

Resultado de los ensayos durante la investigación, concluyeron que los empalmes mecánicos poseen resistencia del 125% al 150% mayor a los empalme por traslape, además de ser más funcionales en su implementación, resultar más confiables, seguros y resistentes (González & Cuevas Florián, 2018).

3.7 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos por el National Cooperative Highway Research Program Transportation, Estados Unidos

Investigación llevada a cabo en la ciudad de Chicago, Estados Unidos, presentó los resultados de una revisión de la literatura, investigación experimental y análisis de datos estadísticos del comportamiento a la fatiga de uniones soldadas y de conectores mecánicos en barras de refuerzo (Paulson & Hanson, 1991).

Se realizaron pruebas de fatiga en 231 barras de refuerzo empalmadas y sin empalmar, específicamente barras No. 5 y No. 8, donde se incluyeron siete tipos de conectores mecánicos y dos tipos de empalmes soldados en las pruebas de fatiga. Con estas pruebas comprobaron que los conectores mecánicos presentan mayor resistencia a la fatiga, mientras que los empalmes soldados mostraron menor resistencia (Paulson & Hanson, 1991).

Por otra parte, los investigadores sugieren que el requisito de alcanzar por lo menos 125% del esfuerzo de fluencia, que se aplican tanto a empalmes mecánicos como soldados, no es suficiente para garantizar un buen rendimiento de fatiga, por lo que sugieren investigaciones que permitan que se establezcan requisitos adicionales en varios tipos de empalmes. Por ejemplo, el grado y calidad del acero en un conector, el nivel de tensión o el rango de tensión en el material de empalme, las deformaciones elásticas e inelástica a través del empalme y la geometría de los detalles de todos los tipos de empalmes podrían especificarse con el fin de obtener buen rendimiento de fatiga y buen rendimiento estático, aunque reconocen el esfuerzo que este trabajo generaría (Paulson & Hanson, 1991).

3.8 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en Ecuador y Chile

El uso de los conectores mecánicos se ha expandido a un gran número de países latinoamericanos. En Ecuador, por ejemplo, la Escuela Politécnica del Ejército desarrollo ensayos de tensión en probetas de acero empalmadas con conectores huecos o extruidos, que son prensados mediante sistemas hidráulicos. Resultado de la investigación, concluyeron que los empalmes mecánicos cumplen satisfactoriamente con el requisito de desarrollar un 125% como

mínimo del esfuerzo de fluencia de las barras de acero, obteniendo un promedio de 142,5% sin importar el diámetro de la barra (López Flores & Valle Ramos, 2012).

Otra investigación muy importante sobre conectores mecánicos fue desarrollada en la Universidad Austral de Chile, en donde se fabricaron probetas de concreto reforzado para aplicar ensayos de tensión. Se utilizaron probetas con empalmes soldados, empalmes traslapados y con empalmes mecánicos, en la figura 26 se muestra una de las probetas ensayadas. Como conclusión de la investigación encontraron que los ejemplares ensayados con conectores mecánicos mostraron una gran resistencia a la tensión, existiendo una gran diferencia respecto a las probetas de los otros sistemas de empalme (Arriagada Meza, 2007).



Figura 26. Probetas de concreto reforzado para aplicar el ensayo de tensión
Fuente: Arriagada Meza, 2007. Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, p.49.

3.9 Evaluación del comportamiento de los conectores mecánicos en la Universidad

Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, Colombia

Como resultado de la recopilación efectuada en el desarrollo de esta monografía, fue posible llevar a cabo ensayos de tensión en probetas de acero empalmadas mediante conectores mecánicos roscados. Estas probetas empalmadas mecánicamente fueron suministradas por la empresa Ramalza S.A.S. como apoyo al desarrollo de este trabajo de grado y con el fin de difundir el uso de los conectores mecánicos en diversas zonas del país.

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de resistencia de materiales y sísmica de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña. Se ensayaron probetas #6 (20 mm), #7 (22 mm) y #8 (25 mm), tres ensayos por cada diámetro. En la figura 27 se muestra las condiciones iniciales de las probetas.



Figura 27. Probetas de acero empalmadas mecánicamente
Fuente: Autores, 2019.

La realización del ensayo de tensión se basó en lo establecido en la NTC-2: Ensayo de tracción para materiales metálicos. Método de ensayo a temperatura ambiente y la NTC-2289: Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto, con el fin de

verificar lo establecido en el numeral C.12.14.3.2 de la NSR-10, donde se indica que todo empalme mecánico completo debe desarrollar en tracción o compresión, según sea requerido, al menos $1.25f_y$ (esfuerzo de fluencia (MPa)) de la barra, esto con el fin de asegurar la suficiente resistencia en los empalmes de manera que se pueda producir la fluencia en el elemento.

Inicialmente, se realizaron las medidas necesarias de las características de cada probeta para la realización del ensayo de tensión, un ejemplo de estas medidas se muestra en la figura 28.



Figura 28. Medición de las características de las probetas de acero
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

Posteriormente cada probeta fue ubicada en la máquina universal y se aplicó una velocidad de ensayo de 6 MPa/s. En la figura 29 se ilustra el montaje de la probeta.



Figura 29. Aplicación de la carga axial a las probetas de acero
Fuente: Autores del proyecto, 2020

Terminado el proceso de aplicación de carga y la rotura de las probetas, éstas eran retiradas de la máquina universal y ubicadas para la medición de sus características, específicamente el diámetro y la longitud final. En la figura 30 se observan las probetas ya ensayadas a tracción.



Figura 30. Probetas de acero después realizar el ensayo de tracción
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

Con los datos de laboratorio se determinó las propiedades mecánicas de las probetas de acero, en la tabla 4 se muestran dos de estas propiedades.

Tabla 4
Resistencia a la fluencia y a la tracción de las probetas ensayadas

Probeta	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
#6-1	448,90	621,49
#6-2	475,27	624,54
#6-3	433,02	635,29
#7-1	454,10	655,01
#7-2	446,40	630,50
#7-3	446,11	605,41
#8-1	483,75	659,89
#8-2	443,77	665,59
#8-3	463,25	653,36

Nota: Resistencia promedio a la fluencia de 454,95 MPa, resistencia promedio a la tracción de 639,01 MPa. Autores, 2019.

Todas las probetas ensayadas cumplieron los requisitos de tracción estipulados por la NTC-2289, tabla A.2, en la cual se establece que la resistencia mínima a la fluencia es de 420 MPa, y la resistencia mínima a la tracción es de 550 MPa. Así mismo se comprobó que los conectores mecánicos suministrados por la empresa Ramalza S.A.S. permiten cumplir con lo establecido en la NSR-10, así como los requisitos del Código de Diseño de Puentes, la ACI-439 y la ACI-318, demostrando de esta manera que es confiable su utilización en la construcción de obras. En la figura 31 y 32 se muestran los valores obtenidos en los ensayos respecto a los valores mínimos exigidos por la

norma.

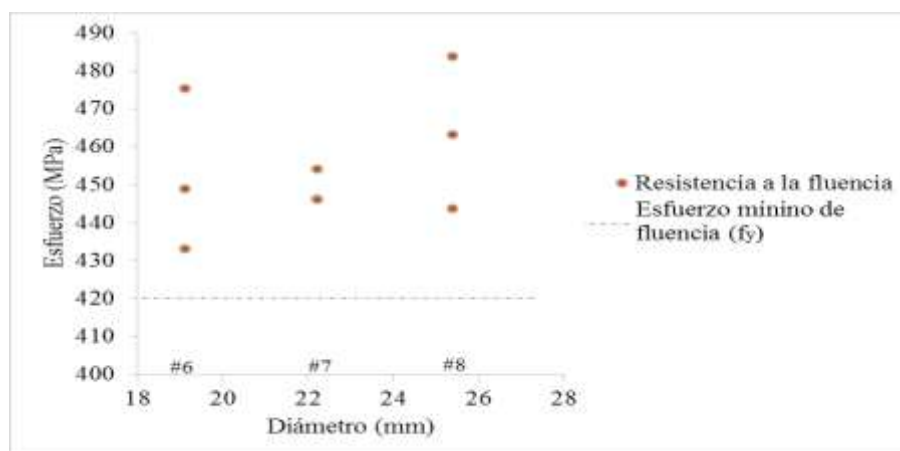


Figura 31 .Resistencia a la fluencia de las probetas ensayadas

Nota: Todas las probetas superan el esfuerzo mínimo de fluencia de 420 MPa. Autores, 2020.

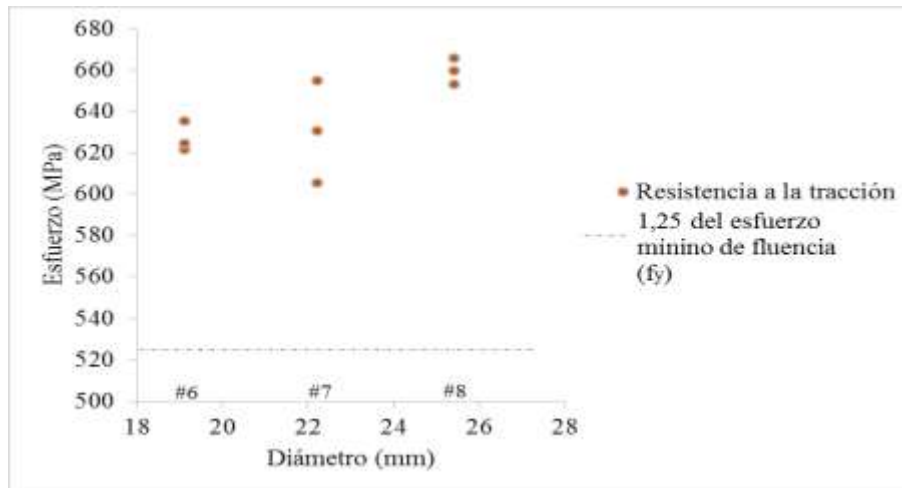


Figura 32. Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas

Nota: Todas las probetas superan la resistencia a la tracción. Autores, 2020.

En el anexo b se muestran en detalle las características de cada una de las probetas ensayadas así como los resultados de los ensayos de tensión efectuados.

Capítulo 4. Análisis económico de los empalmes para barras de refuerzo

El uso de los conectores mecánicos ha empezado a difundirse en muchos países, en especial por los desafíos técnicos que enfrenta la industria de la construcción para garantizar una adecuada conexión de las barras de refuerzo. Los empalmes por traslapo o por soldadura han dejado de ser los mejores sistemas de empalme, ya que no garantizan en muchos casos una correcta transferencia de cargas, no son confiables bajo cargas cíclicas ni adecuados para vanos de gran longitud y pueden resultar muy débiles a la corrosión (Sajjad, Alegría Jithin, & Jung, 2019).

Aunque se ha comprobado experimentalmente las ventajas que pueden ofrecer los conectores mecánicos respecto a otros sistemas de empalme, generalmente su uso en obra está condicionado a las limitantes y restricciones que tienen los traslapos, así como a los aspectos económicos derivados de su uso entre los que se encuentra la mano de obra, los equipos, procedimientos y materiales exigidos según el tipo de conector.

En diversos países se han realizado investigaciones enfocadas en determinar las ventajas económicas que pueden ofrecer los empalmes mecánicos, y en la mayoría se ha demostrado que estos además de cumplir con las altas exigencias normativas existentes en la actualidad, resultan económicos y rentables para quienes los adquieren, tanto constructores como dueños de edificaciones. Sin embargo, los beneficios económicos al usar empalmes mecánicos están condicionadas al diámetro de las barras de acero (McCabe, 2000).

Con el fin de comprobar que diámetros son los que representan un ahorro económico respecto al traslapo, se llevó una investigación en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en la cual se tomaron como referencia dos proyectos de edificación ubicados en la ciudad de Bogotá, el primero es el edificio T7T8, mostrado en la figura 33, y el segundo es el Hotel Grand Hyatt mostrado en la figura 34. En ambos edificios se realizaron empalmes mecánicos para las barras de acero (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017).



Figura 33. Edificio T7T8

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, p.23.



Figura 34. Hotel Grand Hyatt

Fuente: Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017. Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, p.23.

Iniciaron determinando el número de conectores mecánicos utilizados en cada edificio y el costo unitario de su uso, para ello contaron con información suministrada por los constructores de

los edificios, después procedían a calcular la cantidad de acero que se habría empleado mediante el traslapo tradicional y el costo de este proceso. En las tablas 5 y 6 se ilustran los costos por empalmes mecánicos y traslapados, respectivamente, para el edificio T7T8.

Tabla 5
Costos de empalmes mecánicos utilizados en el edificio T7T8

Diámetro barra empalmada	N° de conectores	Valor unitario conector	Valor total
#5 (16 mm)	4234	\$7.021	\$29.726.914
#6 (20 mm)	2934	\$8.806	\$25.836.804
#7 (22 mm)	1348	\$10.115	\$13.635.020
#8 (25 mm)	2456	\$11.662	\$28.641.872
#10 (32 mm)	1886	\$18.921	\$35.685.006

Nota: Precio de los conectores mecánicos para el año 2017. Adaptado de Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017.

Tabla 6
Costos de empalmes traslapados que se habrían utilizado en el edificio T7T8

Diámetro barra empalmada	Longitud (m)	Peso acero (Kg/m)	Peso por unidad de traslapo (Kg)	N° de empalmes	Valor unitario del acero (Kg)	Valor total
#5 (16 mm)	0,7	1,552	1,09	4234	\$2.167	\$9.967.805
#6 (20 mm)	0,9	2,235	2,01	2934	\$2.167	\$12.789.073
#7 (22 mm)	1,2	3,042	3,65	1348	\$2.167	\$10.663.242
#8 (25 mm)	1,4	3,973	5,56	2456	\$2.167	\$29.602.874
#10 (32 mm)	1,7	6,404	10,89	1886	\$2.230	\$45.787.486

Nota: Costo del acero para el año 2017. Adaptado de Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017.

El mismo procedimiento fue realizado para el Hotel Gran Hyatt. En las tablas 7 y 8 se ilustran los costos por empalmes mecánicos y traslapados, respectivamente.

Tabla 7
Costos de empalmes mecánicos utilizados en el Hotel Grand Hyatt

Diámetro barra empalmada	N° de conectores	Valor unitario conector	Valor total
#5 (16 mm)	5346	\$7.021	\$37.534.266
#6 (20 mm)	2645	\$8.806	\$23.291.870
#7 (22 mm)	1348	\$10.115	\$13.635.020
#8 (25 mm)	3348	\$11.662	\$39.044.376
#10 (32 mm)	913	\$18.921	\$17.274.873

Nota: Costo de los conectores mecánicos para el año 2017. Adaptado de Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017.

Tabla 8

Costos de empalmes traslapados que se habrían utilizado en el Hotel Grand Hyatt

Diámetro barra empalmada	Longitud (m)	Peso acero (Kg/m)	Peso por unidad de traslapo (Kg)	N° de empalmes	Valor unitario del acero (Kg)	Valor total
#5 (16 mm)	0,7	1,552	1,09	5346	\$2.167	\$12.585.707
#6 (20 mm)	0,9	2,235	2,01	2645	\$2.167	\$11.529.345
#7 (22 mm)	1,2	3,042	3,65	1348	\$2.167	\$10.663.242
#8 (25 mm)	1,4	3,973	5,56	3348	\$2.167	\$40.354.406
#10 (32 mm)	1,7	6,404	10,89	913	\$2.230	\$22.165.416

Nota: Costo del acero para el año 2017. Adaptado de Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017.

Como se observa en las cuatro tablas anteriores, los costos del empalme mecánico registran un ahorro en los mayores diámetros, #8 (25 mm) y #10 (32 mm), representando su uso sobrecostos de más del 30% en diámetros #5 (16 mm), #6 (20 mm) y #7 (22), respecto al traslapo. Sin embargo, es necesario estudiar valores indirectos que puedan representar grandes ahorros en los diámetros menores, como lo es el tiempo, mano de obra y consumibles (Alvis Fonseca & Guerra Bejarano, 2017). Aunque es un caso en específico, el estudio llevado a cabo demuestra las ventajas económicas que representan los empalmes mecánicos en comparación al traslapo, por lo menos, a partir de cierto diámetro de varilla.

Otra investigación importante fue llevada a cabo en la Universidad Nacional Federico Villareal, donde se efectuó una comparación entre los empalmes mecánicos y los empalmes traslapados en una de las líneas del metro de Lima, Perú (Tarazona Malpartida, 2019).

En el metro de Lima se emplearon conectores mecánicos roscados, debido a las exigencias de los elementos que componen estas estructuras y las solicitaciones a las que se verán sometidas. Se partió de la información existente sobre el número de conectores utilizados y se comparó los

costos de este proceso, frente a los costos que hubiera ocasionado el uso de empalmes traslapados (Tarazona Malpartida, 2019). El proceso para obtener el peso del acero usado en los traslapos fue el mismo efectuado en las tablas 6 y 8. En la tabla 9 y 10 se muestran los costos obtenidos para conectores y traslapos en el metro de Lima incluyendo el costo de la mano de obra, los valores originales se presentaron en dólares.

Tabla 9.
Precios de conectores instalados en el metro de Lima, Perú

Diámetro barra empalmada	Nº de conectores	Valor unitario conector	Valor total
#6 (20 mm)	832	\$60.550	\$50.377.600
#8 (25 mm)	96	\$64.050	\$6.148.800
#11 (35 mm)	5136	\$73.185	\$375.878.160

Nota: Precio de conectores mecánicos para el año 2019. Tarazona Malpartida, 2019.

Tabla 10.
Precios de traslapos instalados en el metro de Lima, Perú

Diámetro barra empalmada	Peso acero de traslapo (Kg)	Valor unitario acero	Valor total
#6 (20 mm)	3198,37	\$5.565	\$17.798.929
#8 (25 mm)	869,61	\$5.565	\$4.839.380
#11 (35 mm)	134826,37	\$5.565	\$750.308.749

Nota: Precio de acero para el año 2019. Tarazona Malpartida, 2019.

De las dos tablas anteriores se determina que para barras de acero #6 (20 mm) a empalmar, el costo al usar conectores resulta mucho mayor que al emplear traslapo, llegando a triplicar el costo. En las barras #8 (25 mm) a empalmar, la variación tiende a ser menor, pero los conectores siguen resultado un poco más costosos, mientras que para barras #11(35 mm) a empalmar, el costo de los conectores resulta mucho menor que el del traslapo, cerca de la mitad, debido a las grandes longitudes de desarrollo que requieren diámetros superiores a las barras #8 (25 mm) (Tarazona Malpartida, 2019).

Por otra parte, un aspecto a resaltar es el enorme ahorro de acero en obra que represento el uso de los conectores mecánicos, pues de haberse empleado traslapos, hubiera sido necesario utilizar más de 138 toneladas de acero, por lo menos en los tres diámetros analizados, que hubieran representado mayores costos en transporte, manipulación, mano de obra, además de aumentar el congestionamiento del refuerzo en los distintos elementos estructurales.

Los dos análisis económicos anteriores comprueban investigaciones realizadas principalmente en Estados Unidos, Corea del Sur y países europeos, como Alemania y Francia, donde se ha concluido que los conectores mecánicos brindan mayor rentabilidad y reducción de tiempo en obra, siendo el sistema de empalme ideal para aplicaciones en túneles, torres, puentes, subterráneos, aeropuertos, estaciones de energía nuclear, edificios de gran altura y muchos más. Por otra parte, la facilidad para instalar el conector en el refuerzo de acero de cualquier diámetro tanto lateral como verticalmente confieren un punto especial al conector, además de ser el empalme con menor impacto ambiental, al reducir el desperdicio en obra, no producir llamas ni ruido como si ocurre con el empalme por soldadura (Sajjad, Alegría Jithin, & Jung, 2019).

Por último, y con el fin de dar un indicativo del valor de los conectores mecánicos en Colombia, a continuación se muestra el valor por unidad de 4 tipos de conectores mecánicos (ver tabla 11) distribuidos por la empresa Ramalza S.A.S. los cuales están disponibles en todo el país. Es de añadir, que los conectores distribuidos por esta empresa corresponden al tipo 2, por lo que cumplen con los requisitos de la norma NSR-2010, Código de Diseño de Puentes, ACI-439 y la ACI-318, como se demostró en el capítulo 3 del presente trabajo de grado.

Tabla 11.
Precio de algunos conectores mecánicos en Colombia

Diámetro barra de acero	Conector terminal o barra con cabeza	Conector roscado	Conector extruido	Conector de tornillo
#5 (16 mm)	\$8.690	\$8.600	\$42.900	\$79.000
#6 (20 mm)	\$10.450	\$10.400	\$53.900	\$85.000
#7 (22 mm)	\$12.980	\$13.100	\$74.800	\$99.800
#8 (25 mm)	\$15.400	\$15.600	\$93.500	\$120.000
#10 (32 mm)	\$24.090	\$23.540	\$107.800	\$149.000

Nota: Precios de conectores mecánicos para el año 2019. Adaptado de Ramalza S.A.S, 2019.

La anterior tabla muestra unas diferencias considerables entre los distintos conectores mecánicos disponibles, esto se debe a los requisitos para instalar cada conector, especialmente la mano de obra, equipos o herramientas necesarias. De tal forma que su elección está condicionada a un análisis exhaustivo tanto de las características que debe cumplir el conector a utilizar así como todos los gastos económicos y humanos necesarios que este requiera.

Capítulo 5. Conclusiones

La información recopilada y los ensayos de laboratorio realizados en esta monografía permitieron concluir lo siguiente:

Actualmente existen tres sistemas de empalmes aceptados por las Normas Colombianas de Sismo-Resistencia (NSR-10) y avalados internacionalmente. Estos sistemas son el traslapo, los conectores mecánicos y la soldadura. El traslapo es el más utilizado por la facilidad y rapidez para su instalación, además de ser ideal para barras de diámetros menores a la varilla #8. Los conectores mecánicos son usados en refuerzos con grandes diámetros, de la #8 en adelante. Por otra parte, la soldadura ofrece ventajas en la transferencia de esfuerzos, pero para su aplicación se requiere de equipo y personal especializados, además que las barras de acero soldadas deben cumplir los requerimientos de ASTM.

En el mercado tanto nacional como internacional existe una amplia oferta de conectores mecánicos, cada uno de los cuales ofrece ventajas al momento de su utilización en obra, por lo que la selección del tipo de conector debe depender de los requerimientos de esfuerzos a los que va estar sometido el refuerzo, así como a las consideraciones técnicas presentadas por los diseñadores.

Los empalmes mecánicos roscados suministrados por la empresa Ramalza S.A.S cumplen satisfactoriamente el requisito de desarrollar por lo menos el 1,25 del esfuerzo de fluencia, por lo que resultan más convenientes respecto al uso de empalmes por traslapo y soldadura, al brindar

una mejor transferencia de cargas, ofrecer mayor integridad estructural, resistencia y solidez en caso de eventos sísmicos o de otro tipo, disminuir la congestión de las barras de refuerzo, permitir conseguir la fracción ideal entre el acero/concreto, no requerir cálculos adicionales como si ocurre con los traslapos, fácil y rápida instalación, reducir trabajo y aumentar la seguridad en obra.

Los análisis económicos recopilados indican que los conectores mecánicos resultan convenientes a partir de diámetros superiores al #8 (25 mm) resultando su ahorro proporcional al diámetro de las barras a empalmar. Además de permitir una reducción considerable del acero requerido en obra.

En la actualidad existe un amplio estudio sobre el comportamiento de los conectores mecánicos y su uso ha sido demostrado en proyectos de gran escala realizados en diversas partes del mundo, especialmente puentes, rascacielos, torres, aeropuertos, entre otros, donde las exigencias normativas resultan más complejas.

Esta monografía permitió divulgar la información más relevante sobre el uso de los conectores mecánicos e incentivar su uso en las construcciones llevadas a cabo a nivel nacional, siendo una alternativa confiable por los resultados que ha presentado en las diversas investigaciones realizadas a la fecha.

Referencias

- Aceros Arequipa. (2018). Empalmes de armaduras para concreto. Recuperado el 21 de Septiembre de 2019, de [acerosarequipa.com](http://www.acerosarequipa.com):
<http://www.acerosarequipa.com/constructoras/boletin-construccion-integral/edicion-11/productividad.html#>
- ACI Committee 439. (1999). Mechanical Connections of Reinforcing Bars. *ACI Structural Journal*, 88(2).
- Alvis Fonseca, D. A., & Guerra Bejarano, J. A. (2017). Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones, Anexo 1. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Facultad Tecnológica, Bogotá D.C.
- Alvis Fonseca, D. A., & Guerra Bejarano, J. A. (2017). Análisis técnico, económico y constructivo del uso de empalmes mecánicos roscados en edificaciones. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Facultad Tecnológica, Bogotá D.C.
- Arriagada Meza, R. A. (2007). Estudio experimental en empalmes de armaduras en elementos de hormigón armado sometidos a tracción. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- ASTM. (2010). Standard test methods for Testing Mechanical Splices for Steel Reinforcing Bars.
- Astorga, A., & Rivero, P. (2009). Definición de Términos Básicos Módulo III-Sección I. Centro de Investigación en Gestión Integral de Riesgos, Mérida, Venezuela.
- Avendaño Cruz, G. A., & Cuevas Velásquez, R. M. (2014). Implementación de empalmes mecánicos en el acero de refuerzo para elementos de concreto armado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Costa Rica.

- Connah, G. (2013). Prequalification of Mechanical Splices for Reinforcing Bars in Seismic Conditions. Australian Earthquake Engineering Society Conference, Sydney, Australia.
- D'yachkov, V. V., Devyatov, V. V., & Vershinin, V. P. (2012). Evolution trend of reinforcement connections in concrete structures. Moscow, Russia.
- Fuentes Espinoza, F. (1982). Ensayos mecánicos en metales. Universidad Autonoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Electrica, Monterrey.
- Giraldo Bolivar, O. (2003). Estructuras de hormigón 1. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- González Cuevas, Ó. M., & Robles Fernández, F. (2005). Aspectos fundamentales del concreto reforzado (Cuarta ed.). México: Limusa.
- González, M. M., & Cuevas Florián, P. Y. (2018). Estudio comparativo entre empalmes por traslape y empalmes mecánicos utilizados en elementos de hormigón armado. Santo Domingo, República Dominicana.
- Hernández Montes, E., & Gil Martín, L. M. (2007). Concreto reforzado y preesforzado. Granada, España: Grupo de investigación TEP-190 Ingeniería e infraestructuras.
- Jiménez Montoya, P., García Meseguer, Á., & Morán Cabré, F. (2000). Hormigón Armado. Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
- Lenton. (2018). Sistemas de empalmes mecánicos para barras de armaduras. Empresa nvent.
- López Flores, A. E., & Valle Ramos, N. E. (2012). Estudio del empalme mecánico de varillas corrugadas mediante conectores cilíndricos huecos y diseño-construcción del sistema hidráulico móvil para el prensado. Escuela Politécnica del Ejército, Carrera de Ingeniería Mecánica.

- Mccabe, S. L. (2000). The performance of mechanical splices. University of Kansas, USA., Civil and Environmental Engineering.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2011). Diseño de Concreto Reforzado (Octava ed.). New Jersey: Alfaomega.
- Nistal Cordero, Á. F., Retana Maqueda, M. J., & Ruiz Abrio, T. (2012). El hormigón: Historia, Antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia. *Tecnologí@ y Desarrollo*, 4-5.
- NSR. (2010). Título C. Bogotá, D.C.: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Paulson, C., & Hanson, J. M. (1991). Fatigue behavior of welded and mechanical splices in reinforcing steel. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board.
- Ramalza S.A.S. (2019). Lista de precios general de conectores mecánicos.
- Sajjad, M., Alegría Jithin, A., & Jung, D.-W. (09 de January de 2019). Fabrication of One-Touch Rebar Coupler for Mechanical Connections. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 5.
- Tarazona Malpartida, K. T. (2019). Análisis comparativo de costos entre empalmes mecánicos y empalmes por traslape en las pilas-pilote de la etapa 1A del proyecto "Línea 2 y Ramal Av. Faucett - Av. Gambetta de la red básica del metro de Lima y Callao". Universidad Nacional Federico Villareal, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Vargas Fernández, R. (2015). Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Costa Rica.

Apéndices

Apéndice A. Características de 3 tipos de conectores mecánicos

Conector mecánico Bargrip XL.

Empalme tipo 2. Se distingue por ser cilíndrico dentro del cual se insertan los extremos de las varillas de acero a empalmar por cada lado, para posteriormente utilizar una prensa en frío en dos etapas. La prensa puede consistir en una tipo banco o en una portátil. Este conector se usa en cualquier tipo de elemento estructural. En la práctica resulta práctico para incorporar conectores en los extremos de las barra a empalmar con prensas de banco o estacionarias, para después cuando se vaya a realizar el armado del acero longitudinal en elementos estructurales prensar el otro extremo de la barra con una prensa portátil. Esto se debe a que si se llega a empalmar ambos extremos de las varillas mecánicamente antes de armar el acero de un elementos se puede volver de difícil manejo debido a la longitud de las varillas empalmadas. Un aspecto a tomar en cuenta con este tipo de conector es que una vez se empalman las barras no se pueden separar (Vargas Fernández, 2015). En las figuras 35 y 36 se puede observar este conector y en la tabla 12 se observan sus respectivas características:



Figura 35. Conector mecánico BarGrip XL

Fuente: Vargas Fernández., 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.29



Figura 36. Corte transversal del conector mecánico BarGrip XL

Fuente: Vargas Fernández., 2015. *Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2)*, p.30

Tabla 12.

Características físicas del conector mecánico BarGrip XL

Diámetro de barra de refuerzo del conector (mm)	Longitud "L" (mm)	Peso (kg)	Diámetro externo "D" (mm)	Diámetro interno "d" (mm)	Longitud de inserción de la barra de refuerzo "I" (mm)
9,52	83	0,12	19	13	41
12,70	102	0,18	24	16	51
15,88	121	0,31	29	19	60
19,05	140	0,57	35	24	70
22,22	159	0,80	40	27	79
25,40	178	1,17	44	30	89
28,65	191	1,50	49	35	95
32,26	210	2,05	56	38	105
35,81	229	2,60	60	43	114
44,45	279	5,40	75	50	140
57,15	356	10,90	97	67	178

Nota: Dimensiones nominales del conector. Vargas Fernández., 2015.

Conector mecánico Taper Threaded Grip-Twist.

Empalme tipo 2. Está conformado por dos partes (macho y hembra). Estas partes se enroscan entre sí para formar el empalme. Cuando se van a instalar primero se prensan en frío el macho y la hembra en cada uno de los extremos de las varillas de acero a unir, después cuando se

coloca el acero se enroscan en ambos extremos. Con esto se obtiene una preparación de las barras de refuerzo por separado, es decir, las varillas prensadas con el macho y la otra prensada con la hembra para un futuro cuando se vaya a hacer el armado del acero de un elemento nada más se enroscan entre sí los dos extremos manualmente. Debido al ensamblaje, este conector suele instalarse en un apoyo mediante la ayuda de una prensa portátil o con la prensa de banco. De ser necesario la rotación o el giro del refuerzo para poder empalmar se enroscan los extremos de las varillas. Como conector resultan muy útiles en construcciones de espacio limitado, debido a que ambos extremos de las varillas de refuerzo quedan separadas previamente antes de la colocación del acero y después, manualmente, se enroscan los extremos para formar el empalme. A su vez, permite su separación manualmente por si existe un error en la colocación del acero, nada más bastaría con desenroscarlo (Vargas Fernández, 2015). En las figuras 37 y 38 puede observarse este conector y en la tabla 13 se muestran sus características:



Figura 37. Conector mecánico Taper Threaded Grip-Twist

Fuente: Vargas Fernández., 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.31.

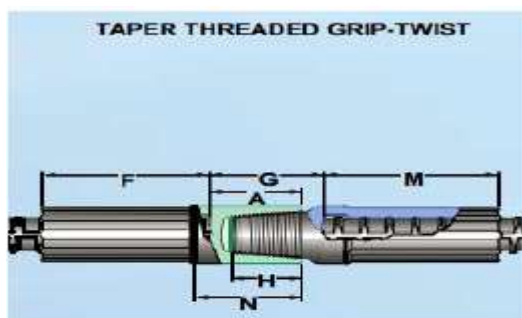


Figura 38. Dimensionamiento del conector mecánico Taper Threaded Grip Twist
Fuente: Vargas Fernández., 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.31.

Tabla 13.

Características físicas del conector mecánico Taper Threaded Grip Twist

Diámetro de barra de refuerzo del conector (mm)	Peso del conector (kg)		Dimensiones (mm)					
			Inserción de barra después de prensado		Espacio entre barras	Inserción Macho	Distancia	Longitud no prensada
			F	M				
9,52	0,09	0,08	35	35	38	14	25	29
12,70	0,14	0,14	45	45	45	19	30	33
15,88	0,24	0,24	57	56	48	23	35	40
19,05	0,45	0,41	70	67	54	29	40	46
22,22	0,68	0,64	79	78	64	33	48	54
25,40	0,95	0,91	91	89	73	38	54	60
28,65	1,29	1,29	102	99	83	45	62	70
32,26	1,84	1,81	114	111	92	51	70	79
35,81	2,22	2,27	124	122	89	54	70	79
44,45	4,11	4,13	154	149	111	64	84	98
57,15	9,21	9,62	200	194	143	83	110	129

Nota: Dimensiones nominales del conector. Vargas Fernández., 2015

Conector mecánico Zap-Screwlock.

Empalme tipo 2. Este conector mecánico es instalado mediante tornillos. Es un cilindro formado por orificios con tornillos y en el centro posee un tope para que este quede centrado con

respecto a los extremos de las barras que se están empalmando. Cuando los extremos de las barras son introducidos dentro del conector se procede a atornillar las barras con un taladro de impacto (o una llave manual) hasta que se desprenda la cabeza de los tornillos. Este conector es usado en situaciones muy específicas, por ejemplo, cuando se requieren reparaciones o extensiones de elementos donde el espacio sea reducido y no quepa una prensa portátil para colocar otro tipo de conector mecánico. También se utilizan para ampliación de vigas, muros, losas con espacio reducido y donde no se posible usar la prensa portátil o no haya disponibilidad de esta. La correcta instalación del conector Zap-Screwlock depende del adecuado ajuste de los tornillos en los extremos siguiendo hacia los más internos internos (Vargas Fernández, 2015). En las figuras 39 y 40 se observa este tipo de conector y en la tabla 14 se muestran sus características:



Figura 39. Conector mecánico Zap-Screwlock

Fuente: Vargas Fernández., 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.31.

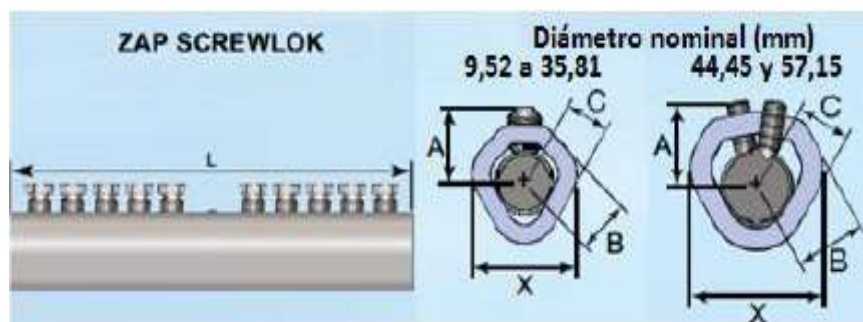


Figura 40. Dimensionamiento del conector mecánico Zap Screwlok

Fuente: Vargas Fernández., 2015. Análisis de la resistencia a tensión y costos de empalmes mecánicos usados en barras de acero de refuerzo (con conectores prensados y atornillados tipo 2), p.32.

Tabla 14.

Características del conector mecánico Zap Screwlok

Diámetro de barra de refuerzo del conector (mm)	Dimensiones (mm)					Peso (kg)	Número de tornillos por conector
	L	A	B	C	X		
9,52	127	21,00	19	13	41	0,45	4
12,70	178	27,00	24	16	51	1,00	6
15,88	229	29,00	29	19	60	1,54	8
19,05	280	30,00	35	24	70	2,13	10
22,22	330	32,00	40	27	79	3,45	10
25,40	388	33,00	44	30	89	4,94	12
28,65	426	41,00	49	35	95	7,98	12
32,26	486	43,00	56	38	105	9,71	14
35,81	546	46,00	60	43	114	11,50	16
44,45	391	59,00	75	50	140	14,40	18
57,15	749	64,00	97	67	178	33,60	42

Nota: Dimensiones nominales. Vargas Fernández., 2015.

Apéndice B. Ensayos de tensión

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			1		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#6-1	19,10	51,00	3,55	1,20	54°	9,57
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM	PESO W GRAMOS		
COLT6W60	14,70	55,10	332,00	1299		
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA		420,00		550,00		
OBTENIDA:	128,62	448,90	178,07	621,49	133,69	8,04
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25fy REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 41. Resultados ensayo de tensión probeta #6-1

Fuente: Autores del proyecto, 2020.

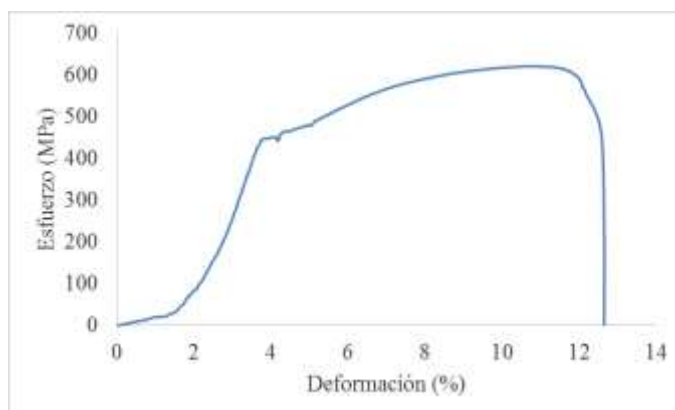


Figura 42. Esfuerzo vs deformación probeta #6-1

Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			2		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL:	CIRCULAR					
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDAD VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
	#6-2	19,12	51,20	3,35	1,55	69
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
	COLT6W60	15,43	55,00	332,00	1293	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA:		420,00		550,00		
OBTENIDA:	136,46	475,27	179,32	624,54	158,24	7,42
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1.25Fy REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 43. Resultados ensayo de tensión probeta #6-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

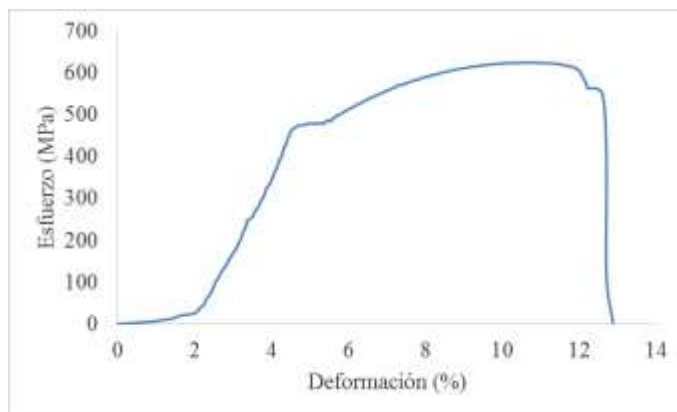


Figura 44. Esfuerzo vs deformación probeta #6-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			3		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPELOR VENA MM	PROFUNDIDAD VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#6-3	19,10	51,00	4,77	0,99	81	10,06
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM	PESO W GRAMOS		
COLT6W60	17,90	55,50	335,00	1311		
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA:		420,00		550,00		
OBTENIDA:	124,07	433,02	182,02	635,29	170,03	8,82
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA ROSCA DEL CONECTOR MECÁNICO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25F _y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 45. Resultados ensayo de tensión probeta #6-3
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

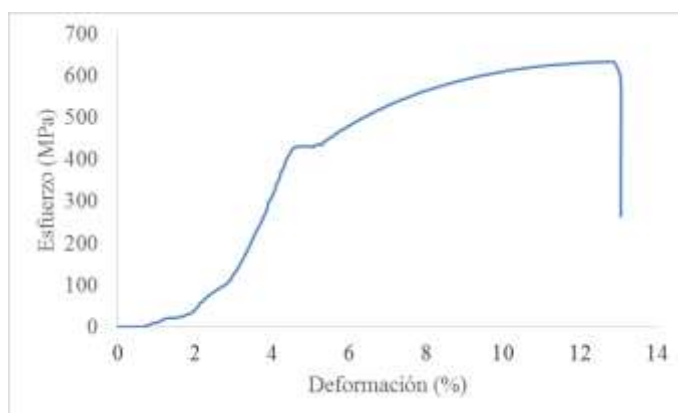


Figura 46. Esfuerzo vs deformación probeta #6-3
Fuente: Autores del proyecto, 2020

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			4		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#7-1	22,20	52,00	5,31	1,69	73	11,65
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
COLT7W60	16,19	57,50	332,00		1783	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	kN	%
MÍNIMA:		420,00		550,00		
OBTENIDA:	175,77	454,10	253,54	655,01	206,00	10,58
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25F _y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 47. Resultados ensayo de tensión probeta #7-1
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

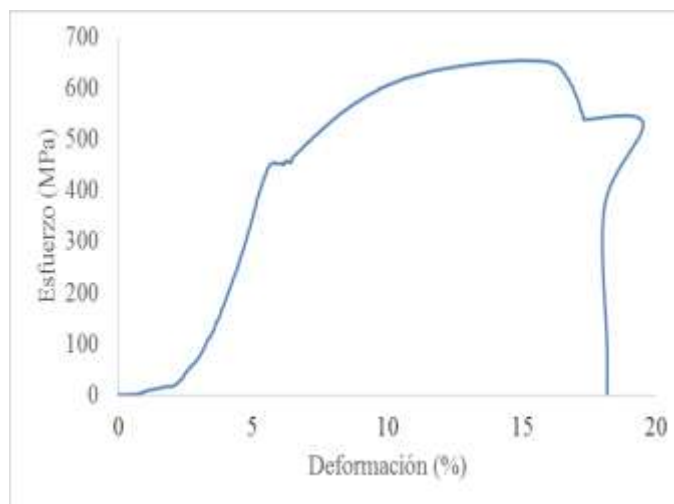


Figura 48. Esfuerzo vs deformación probeta #7-1
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			5		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#7-2	22,20	52,00	5,33	1,50	55	11,84
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
COLI7W60	17,44	56,50	334,00		1767	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA		420,00		550,00		
OBTENIDA:	172,79	446,40	244,05	630,50	208,07	8,65
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25F _y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 49. Resultados ensayo de tensión probeta #7-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

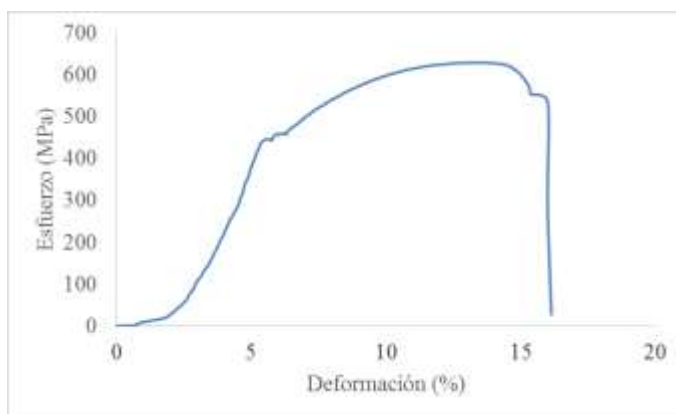


Figura 50. Esfuerzo vs deformación probeta #7-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			6		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#7-3	22,20	51,20	5,03	1,32	71	9,87
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
COLT7W60	20,20	55,50	333,00		1707	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA:		420,00		550,00		
OBTENIDA:	172,68	446,11	234,34	605,41	202,70	8,40
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA ROSCA DEL CONECTOR MECÁNICO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25Y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 51. Resultados ensayo de tensión probeta #7-3
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

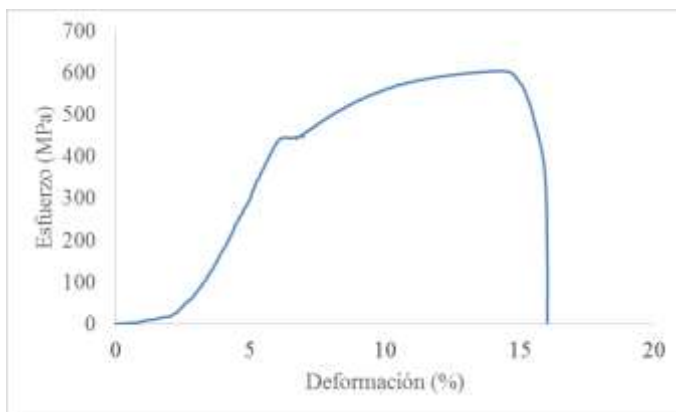


Figura 52. Esfuerzo vs deformación probeta #7-3
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSION EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			7		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#8-1	25,40	51,50	4,90	1,27	73	9,93
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
COLT8W60	23,23	56,50	332,00		2283	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSION		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA		420,00		550,00		
OBTENIDA:	245,12	483,75	334,37	659,89	308,87	9,71
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25Fy REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 53. Resultados ensayo de tensión probeta #8-1
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

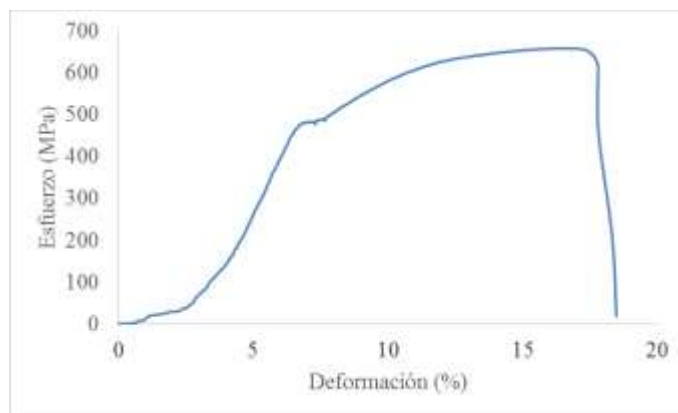


Figura 54. Esfuerzo vs deformación probeta #8-1
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			8		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO INICIAL MM	LONGITUD INICIAL CM	ESPESOR VENA MM	PROFUNDIDA D VENA MM	ÁNGULO VENA	SEPARACIÓN CORRUGA MM
#8-2	25,40	52,00	5,83	1,75	70	13,15
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO FINAL MM	LONGITUD FINAL CM	LONGITUD ENTREMORDAZA MM		PESO W GRAMOS	
COLT8W60	23,85	56,50	330,00		2375	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA OBTENIDA:	224,86	443,77	337,26	665,59	328,03	8,65
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA ROSCA DEL CONECTOR MECÁNICO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25F _y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 55. Resultados ensayo de tensión probeta #8-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

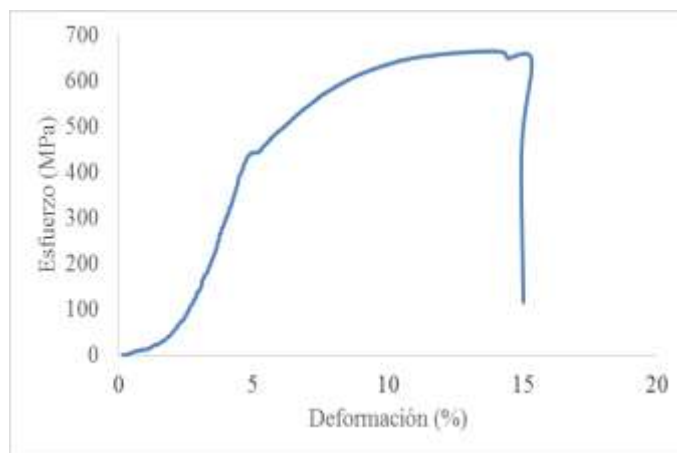


Figura 56. Esfuerzo vs deformación probeta #8-2
Fuente: Autores del proyecto, 2020.

INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A TENSIÓN EN BARRAS CORRUGADAS						
FECHA DE ENSAYO	NOVIEMBRE 13 DE 2019			ENSAYO N°		
NORMA REFERENCIA	NTC 2289			9		
PROVEEDOR PROBETAS	RAMALZA S.A.S					
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS DE ACERO CORRUGADO						
TIPO SECCIÓN TRANSVERSAL: CIRCULAR						
IDENTIFICACIÓN PROBETA	DIÁMETRO	LONGITUD	ESPEJOR	PROFUNDIDA	ÁNGULO	SEPARACIÓN
	INICIAL MM	INICIAL CM	VENA MM	D VENA MM	VENA	CORRUGA MM
#8-3	25,40	51,80	5,48	1,76	68	10,13
REFERENCIA DEL ACERO	DIÁMETRO	LONGITUD	LONGITUD		PESO W GRAMOS	
	FINAL MM	FINAL CM	ENTREMORDAZA MM			
COLT8W60	22,32	57,50	337,00		2313	
PROPIEDADES MECÁNICAS						
	RESISTENCIA A LA FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TENSIÓN		RESISTENCIA A LA ROTURA	DEFORMACIÓN PROBETA DESPUÉS DE ROTURA
	kN	MPa	kN	MPa	KN	%
MÍNIMA:		420,00		550,00		
OBTENIDA:	234,73	463,25	331,06	653,36	293,03	11,00
OBSERVACIONES						
ENSAYO DE VARILLA CORRUGADA CON CONECTOR ROSCADO						
FALLO EN LA VARILLA DE ACERO						
EL ENSAYO SUPERA EL 1,25F _y REQUERIDO EN LOS EMPALMES MECÁNICOS						

Figura 57. Resultados ensayo de tensión probeta #8-3

Fuente: Autores del proyecto, 2020.

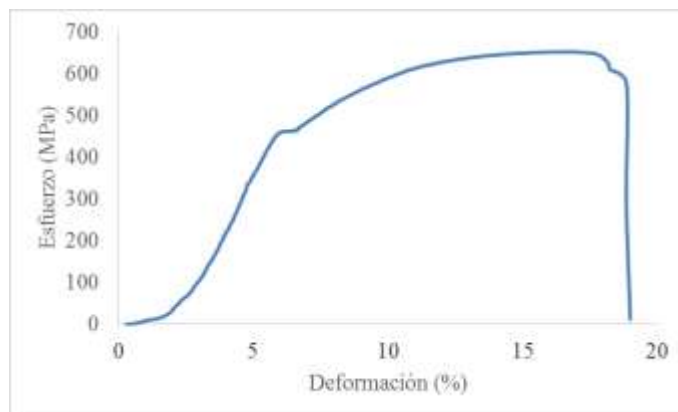


Figura 58. Esfuerzo vs deformación probeta #8-3

Fuente: Autores del proyecto, 2020.